

TARTU ÜLIKOOL
MATEMAATIKA-INFORMAATIKATEADUSKOND
Arvutiteaduse Instituut
Infotehnoloogia eriala

Arvi Kiik

LEGO MINDSTORMS NTX robotikakomplektiga ühilduva jõuanduri tutvustus ja ülesanded

Bakalaureusetöö (6 EAP)

Juhendaja: lektor Anne Villems
Kaasjuhendaja: spetsialist Taavi Tuvin

Autor:““ juuni 2011

Juhendaja:““ juuni 2011

Kaasjuhendaja:““ juuni 2011

Lubada kaitsmisele

Professor:““ juuni 2011

TARTU 2011

Sisukord

Sissejuhatus	3
1. Jõu mõõtmise võimalustest ja andurite rollist	5
1.1 Jõud.....	6
1.2 Anduritega seotud põhimõisted.....	8
1.3 Jõuanduri ehitus.....	11
2. LEGO MINDSTORMS ja Vernier jõuandur	14
2.1 LEGO MINDSTORMS NXT roboti tutvustus	15
2.2 Vernier jõuanduri kirjeldus	15
2.3 Vernier jõuanduri tööpõhimõte	16
2.4 Vernier jõuanduri kasutamine	17
2.5 Vernier jõuanduriga kaasasolevad komponendid	19
2.6 Vernier jõuanduri ühendamine LEGO MINDSTRMS NXT juhtplokiga.....	21
2.7 Vernier jõuanduri programmeerimine.....	21
2.7.1 Vernier andurite ploki importimine LEGO MINDSTORMS NXT-G v2.0 keskkonda.....	22
2.7.2 LEGO MINDSTORMS NXT-G jõuanduri plokk.....	23
3. Ülesanded	27
3.1 Ülesanne 1 - Mobiiltelefonile mõjuva raskusjõu määramine.....	28
3.2 Ülesanne 2 - Mobiiltelefonile mõjuva hõõrdejõu määramine.....	30
3.3 Ülesanne 3 - NXT roboti tõmbejõu määramine	33
3.4 Ülesanne 4 - Loendur	35
3.5 Ülesanne 5 - NXT roboti seinaga kokkupõrkejõu arvutamine.....	37
Kokkuvõte	40
Dual-Range Force sensor for LEGO MINDSTORMS NXT	41
Abstract	41
Kasutatud kirjandus.....	42
Lisad	45
Lisa 1 – Ülesannete lahendused ja videod	45

Sissejuhatus

Koolides õppetöö huvitavamaks muutmiseks on välja töötatud robotikakomplekt LEGO MINDSTORMS NXT. NXT komplekt koosneb kolmest mootorist, neljast põhiandurist, juhtplokist ning paljudest väiksematest detailidest. Õpikomplekt võimaldab nii lastel kui miks mitte ka täiskasvanutel oma teoorias omandatud teadmiseid kohe praktikas järgi proovida. Võimalus on ehitada eri tüüpi ja otstarbega roboteid ning protsess on huvitav ja kaasahaarav, arendades samas loogilist mõtlemist ja programmeerimisoskust.

Standardkomplekti kuuluvate andurite hulk seab siiski teatud piirangud nähtustele, mida robot on võimeline tajuma. Lahendust sellele probleemile pakuvad mitmed firmad (Vernier [37], HiTechnic [14], Mindsensors [26]), kes toodavad väga erinevaid robotikakomplektiga ühilduvaid andureid.

Sageli ei ole kolmandate osapoolte valmistatud anduritega kaasasolev dokumentatsioon kuigi põhjalik ning eestikeelne informatsioon puudub sootuks, mistõttu on selliste andurite kasutamine Kooliroboti projekti [21] raames raskendatud. Käesolev teadustöö keskendub selle probleemi lahendamisele ühe anduri jaoks, milleks on firma Vernier poolt toodetud jõuandur.

USA firma Vernier toodab andmekogujaid ja erinevad andurid (kokku üle 60) füüsika, bioloogia, keemia õpetamiseks ning laboritööde läbiviimiseks nii sise- kui ka välistingimustes. Andurid on näiteks õpetajatele ja õpilastele heaks demonstratsioonivahendiks ja praktiliste tööde tegemiseks.

Antud bakalaureusetöö hakkabki põhjalikumalt kirjeldama LEGO MINDSTORMS NXT robotiga ühilduva Vernier jõuanduri ehitust ja tööpõhimõtet. Töö eesmärgiks on lugejale anda põhjalik ülevaade kõnealusest andurist ja selle kasutamisest.

Bakalaureusetöö on jaotatud kolmeks peatükiks, millest esimeses antakse ülevaade jõust, selle olemusest ja leidmisest ning selgitatakse anduriga seotud põhimõisteid. Samuti kirjeldatakse jõuandurite ehitust ja ühiseid omadusi. Teises osas keskendutakse konkreetsele Vernier jõuandurile, seletatakse selle tööpõhimõtet, kasutamise võimalusi ning programmeerimist LEGO MINDSTORMS NXT-G keskkonnas. Kolmandas osas on töös eelnevalt kirjeldatud

andurile loodud erinevad ülesandepüstitused, kus on loetletud ka lahendamiseks vajalikud komponendid ja teadmised. Ülesannete lahendusfailid asuvad töös lisade all kaasasoleval CD plaadil.

Bakalaureusetöös esinev tekst peab olema võimalikult kergesti mõistetav ja arusaadav, kuna töö on mõeldud õppematerjaliks üldhariduskooli õpetajatele ja õpilastele. Töö struktuur peab jälgima etteantud vormistus- ja mõistekasutusnõudeid. Sarnast struktuuri kasutatakse ka teistes LEGO MINDSTORMS NXT andureid käsitlevates bakalaureusetöödes.

1. Jõu mõõtmise võimalustest ja andurite rollist

Legend räägib, et kord õunapuu all istudes kukkus Newtonile õun pähe. See pani teda mõtlema, et miks asjad kukuvad alati alla, ega jää hõljuma või ei lenda hoopistükkis ülespoole. Nendele küsimustele vastuseid otsides jõudis ta järeldusele, et Maa peab omama mingit külgetõmbejõudu ja nimetas selle jõu raskusjõuks [1].

Jõu mõõtmiseks on kaks põhimõtteliselt erinevat võimalust. Jõudu saab mõõta vastastikmõju poolt tingitud kujumuutuse ehk deformatsiooni suuruse kaudu. Näiteks füüsikatunnist meile tuttav dünamomeeter näitab jõu suurust vedru pikenemise kaudu. Teiseks võib jõu suurust arvutada teatud massiga kehale antava kiirenduse abil. Newtoni katsed, kus uuriti, millest ja kuidas sõltub vastastikmõjus osaleva keha kiirendus, võimaldaski Newtonil jõuda oma mehaanika teise põhiseaduse sõnastuseni [12]. Mainitud seadusest tuleb täpsemalt juttu punktis Jõud.

Jõu mõõtmiseks on võimalik kasutada ka selleks spetsiaalselt ettenähtud andurit. Andurid on seadmed, mis võimaldavad muuta teatud mõõdetava füüsikalise suuruse mingiks teiseks suuruseks, mida on parem mõõta või töödelda. Näiteks jõu suurus teisendatakse anduris elektriliseks signaaliks, mis juhitakse signaali mõõtvasse seadmesse. Seejärel antud seade töötleb signaali ning väljastab arvulise tulemuse mõõteaparaadi ekraanile.

Andurite rolli tutvustamiseks vaatame, milliseid andureid kasutatakse autode juures. Temperatuuri andur mõõdab mootori jahutusvedeliku temperatuuri. Saadud info abil juhitakse auto mootori ventilaatori tööd. Õlirõhu andur mõõdab mootoris õli rõhku. Lambda andur kindlustab, et mootori õhu ja kütuse varustamine oleks õigesti reguleeritud. Seega on lambda andur garantiiks väikesele saastele, mootori sujuvale tööle, optimaalsele kütusekulule. Auto liikumist mõjutavad ABS süsteem (*Anti-lock braking system* - on elektrooniline süsteem, mis ei lase pidurdamisel auto ratastel blokeeruda. See tähendab, et ABS süsteem mõõdab pidurdamisel erinevate jõudude mõjumist ning hoiab pidurdamisel ratast libisemise ja veeremise piiril, tänu millele jääb auto juhitavaks) ja stabiilsuskontroll, kus jälgitakse rataste libisemist paigaltvõtul ja kiirendamisel [5]. Anduritelt saadud andmeid töötleb mootori juhtplokk ja seadistab mootori töö võimalikult ökonoomseks ja ühtlaseks. See kõik on välja mõeldud selleks, et suurendada liiklusohutust.

Seega on anduritel väga vastutusrikas ülesanne. Nende kogutud ja edastatud andmetest sõltub kogu süsteemi töö. Samuti hoiatavad andurid võimaliku vea või rikke eest. Tänu selle on võimalik vastav veaallikas kindlaks teha ning kõrvaldada enne, kui see päris töötamast lakkab. Järgnevalt tuleb juttu jõuanduriga seotud põhimõistest jõud.

1.1 Jõud

Arvatavasti on paljud meist oma elus kogenud, et kõik mõjud on vastastikused. Näiteks kui üks inimene lükkab kõvasti teist inimest, siis on ta ise ka sellest lükkest mõjutatud ning liigub selle tulemusena tahapoole. Teiste sõnadega: igale mõjule on olemas vastumõju. Füüsikas on kehade vastastikuse mõju kirjeldamine lihtsam kui enamikus muudes valdkondades (näiteks psühholoogias või bioloogias), kuna nii füüsikaline katse kui ka teooria rajanevad matemaatilal. Seetõttu on võimalik mõju suurust mõõta [20].

Füüsikalist suurust, mille abil iseloomustatakse kahe keha vastastikmõju tugevust, nimetatakse jõuks. Jõud võivad töötada samas suunas, kindla nurga all või teineteise vastu. Pinge venitatud kummipaelas, raskusjõu mõju vihmapiisale ja reaktiivlennuki veojõud on kõik näited jõudude kohta. Jõud on mõju, mis võib panna objekti liikumist alustama, seda aeglustama, suunda muutma või siis objekti kuju muutma.

Jõud esinevad alati paaris. Kui näiteks suusataja lükkab suusakepiga endale hoogu, siis kepile tahapoole suunatud jõud tekitab jõu, mis lükkab suusatajat ettepoole. Need jõud on suuruselt võrdselt, kuid toimivad vastassuundades. Mõnikord on jõudude paarist üks vähem ilmne kui teine. Jõud, mis tõmbab palli maa poole, on põhjustatud gravitatsioonist. Just samuti nagu tõmbab Maa palli, tõmbab ka pall Maad enda poole. Et aga Maa mass on nii suur, siis on tema liikumine palli suunas tühine [17].

Jõudu määratlevad tugevus ja suund (mõnikord on oluline ka rakenduspunkt). Tegemist on seega vektoriaalse suurusega. Vektoriaalne suurus on füüsikaline suurus, mida väljendatakse vektorina. Vektoriaalsel suurusel on alati olemas kindel suund. Jõudu tähistatakse enamasti sümboliga \vec{F} . Jõu kui füüsikalise suuruse definitsioonavaldiseks võib pidada Newtoni II seadust, mille kohaselt keha kiirendus (\vec{a}) on võrdeline temale mõjuva jõuga ja pöördvõrdeline massiga (m). Võttes võrdeteguri üheks, saame

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} \implies \vec{F} = m\vec{a}$$

Siin tuleb tähele panna, et ka keha mass m vajab defineerimist. Massi defineerimiseks võib kasutada Newtoni III seadust, mille kohaselt mõju ja vastumõju on võrdsed (ja vastassuunalised). Seega, kui kaks keha (massidega m_1 ja m_2) mõjutavad üksteist vastastikku, siis $m_1 a_1 = m_2 a_2$, mis lubab jõust sõltumatult määrata masside suhte (m_1 / m_2) [18].

SI on rahvusvaheline mõõtühikute süsteem (*International System of Units*), mis kasutab seitset füüsikalist suurust põhisuurustena. Nende suuruste mõõtühikud on põhiühikud. Njuuton (tähis N) on SI-süsteemis jõu mõõtühik. Njuuton võrdub jõuga, mis annab kehale massiga 1 kg jõu mõjumise suunas kiirenduse 1 m/s^2 . Ühekilogrammisele massile mõjub raskusjõud 9,8 N. Tavaline automootor võib tekitada veojõu kuni 4500 N, samal ajal kui Boeing 747 "JumboJet" neli Rolls Royce RB211-524 reaktiivmootorit arendavad lendu tõusmiseks täie võimsusega töötades kokku veojõudu enam kui 1 000 000 N. Nimetus "njuuton" pandi ühikule klassikalise mehaanika rajaja Isaac Newtoni auks. Jõu mõõtühiku saab tuletada Newtoni teisest seadusest [34, 15]:

$$F = m \cdot a, \text{ seega } 1N = 1kg \cdot 1 \frac{m}{s^2} = 1 \frac{kg \cdot m}{s^2}$$

Kui valida jõu ühik nii, et võrdetegur oleks võrdne ühega, saaksime lihtsaima valemi. Võttes keha massiks 1 kg ja jõu poolt temale antavaks kiirenduseks 1 m/s^2 , saame, et $1 \text{ N} = 1 \text{ kg} \cdot 1 \text{ m/s}^2$. Kui kehale mõjub jõud, siis saab keha kiirenduse ja kiirus muutub. Näiteks mootori jõul hakkab laev üha kiiremini liikuma. Mida tugevam on jõud, seda suurem on kiirendus.

Kõigil looduses esinevatel jõududel on midagi ühist. Nimelt kehtib kõikide jõudude puhul reegel: kehade vahekauguse suurenemisel jõud nende vahel nõrgenevad, lähenemisel aga tugevnevad. Meeles tuleb pidada, seda, et mõnikord pole jõudude ilmnemist tunda, kuna erinevaid kehi omavahel mõjutavad jõud on väga väikesed. Järgnevalt on selgitatud anduri juures kasutatavad põhimõisted.

1.2 Anduritega seotud põhimõisted

Andur on seade, mis muundab mõõdetava füüsikalise suuruse (näiteks rõhu, kiiruse või jõu) teiseks suuruseks (signaaliks), mida on parem võimendada, mõõta, edastada või töödelda. Andurite kasutusala kuulub automaatika ja mõõtetehnika valdkonda. Andureid võib lugeda nii automaatika- kui ka mõõtevahenditeks [3].

Automaatika on omakorda teadus- ja tehnikaharu, mis tegeleb automaatseadmete ja automatiseeritavate tehnoloogiliste protsesside kontrollimise, juhtimise meetodite ning vahenditega. Automaatikasüsteemide töö rajaneb süsteemi kuuluvate seadmete ja süsteemiosade seisundit kirjeldaval informatsioonil, mida edastatakse elektriliste, pneumaatiliste (sururõhul töötavate), hüdrauliliste, optiliste jm. signaalide abil [25].

Süsteemis toimuvat sündmust, mida iseloomustatakse teatud füüsikalise suuruse muutumisega ning millega toimub info edastamine vastuvõtjale, nimetatakse signaaliks [32]. Signaale saab eristada nii vormi kui ka keskkonna järgi. Suur osa looduslikest ja tehnilistest protsessidest on pidevatoimelised, see tähendab, et neid iseloomustavad pidevatoimelised olekusignaalid, mida saab mõõta suvalisel ajahetkel ning millel on lõpmata arv olekuid. Pidevatoimelisi signaale nimetatakse analoogsignaalideks (*analogue signal*) [30]. Analoogsignaal muutub katkematult ehk pidevalt. Digitaal- ehk arvsignaal on selline signaal, millel on kindla ajavahemiku jooksul muutumatu väärtus [31]. Teisiti sõnastatult on digitaalsignaal analoogsignaali esitus, millel on lõplik arv olekuid ning iga olekut on võimalik esitada kindla arvuga.

Muundur on anduris paiknev detail, mis võimaldab teisendada kindla füüsikalise suuruse mingiks teist liiki väärtuseks. Muunduriga võib teisendada näiteks järgmiste kategooriate erinevaid väärtusi: kaugused, mahud, kaalud, temperatuurid, kiirused.

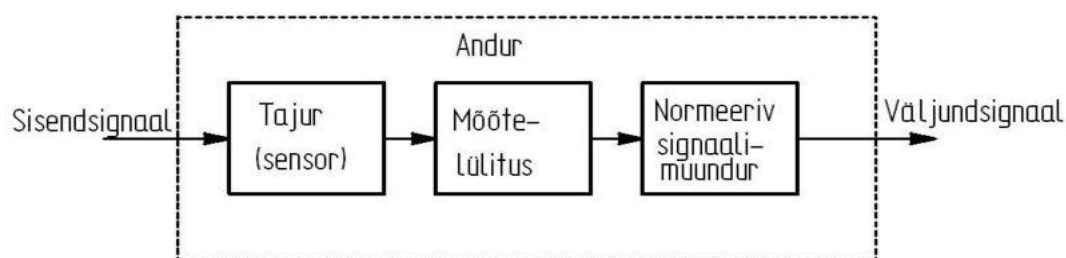
Enamikes andurites toimub signaalide muundamine kahes etapis. Esmased ehk primaarmuundurid muundavad signaali liiki (näiteks mehaanilise suuruse elektriliseks). Signaali liiki on vaja muuta selleks, et seda signaali saaks kiiremini ja kergemini liigutada signaali vastu võtvasse ning töötlevasse seadmesse. Näiteks elektrilist signaali saab palju kiiremini ja kergemini edastada kasutades selleks elektrit juhtivat kaablit. Anduri primaarmuundurit nimetatakse ka tajuriks või sensoriks [25].

Teisesed ehk sekundaarmuundurid on muundurid, mis viivad signaali kindlale ühtlustatud kujule, et meil oleks võimalik antud signaali lugeda [3]. Tensotajur on takistustajurite hulka kuuluv tajur, mille takistus muutub tajuri keha kuju muutumisel ehk deformeerimisel [34]. Tensotajureid saab kasutada erinevate jõudude, jõumomentide (jõumoment iseloomustab vaadeldava jõu mõju keha pöörlemisele.) , rõhkude ning liikuvates süsteemides ka kiirenduse mõõtmiseks.

Sekundaarmuunduriteks võivad olla erinevad seadised:

- Võimendi – on seade, mis muudab ühe signaali teiseks signaaliks. Teise signaali puhul ei pruugi olla tegemist võimsama signaaliga. Tavaliselt mõistetakse võimendi all elektroonikaseadist, mis võimendab nõrkasid elektrisignaale tugevamaks [41].
- Analoog-digitaalmuundur – on seade, mis muundab analoogsignaali digitaalsignaaliks) [2].
- Digitaal-analoogmuundur – on seade, mis muundab digitaalsignaali (tavaliselt binaarne) soovitud analoogsignaaliks (elektrivooluks, pingeks vms) [7].

Andur koosneb seega füüsikalise suuruse muundamiseks ette nähtud tajurist, mõõtelülitusest ning normeerivast signaalmuundurist (vt. Joonis 1) [3].



Joonis 1. Anduri üldine plokkskeem [4]

Sõltuvalt kogutava informatsiooni hulgast võib eristada nelja liiki andureid [25]:

1. Andurid, mis tuvastavad signaali olemasolu või selle puudumist (ühebitised).

2. Andurid, mis tuvastavad, kas signaal vastab soovitudle ning milline on hälbe suund ehk märk (kahebitised).
3. Andurid, mis väljastavad mõõdetava suuruse etteantud täpsusega arvvaartusena (n-bitised).
4. Andurid, mille väljundsignaali täpsus sõltub mõõdetavast signaalist, nt suure signaali korral väiksem, väikese signaali korral suurem (n-bitised).

Andurid on automaatikasüsteemis väga vastutusrikkad elemendid, sest anduri viga mõjutab kogu süsteemi tööd. Sageli on ka andurite töötingimused võrreldes automaatikasüsteemi teiste elementidega palju raskemad, sest neid pole võimalik kaitsta keskkonna kõrge temperatuuri, vibratsiooni, keemilise agressiivsuse, ekstreemsete jõudude ja momentide ning muu kahjuliku toime eest. Võrdluseks näiteks juhtseadet saab kaitsta sobiva kerega, piisava kaugusega ohtlikust tsoonist või sobiva tehiskeskkonna loomisega [25]. Anduri sisendsignaali mõjutavad sageli juhusliku iseloomuga signaalid, mida anduri seisukohalt loetakse mõõtemüraks [27]. Näite saab tuua muusika valdkonnast. Muusikas loetakse mõõtemüraks heli, mis tekib heliallika korrapäratul võnkumisel. Müra erineb muusikalisest helist konkreetse helikõrguse puudumise tõttu.

Süsteemi omadust, mis avaldub tingimustes, kus üleminek ühelt režiimilt teisele ei tarvitse olla sujuv, vaid võib toimuda järsu režiiminihkena, nimetatakse hüstereesiks. Hüstereesi all mõeldakse seejuures olukorda, kus tagasipöördumine esialgsesse seisundisse ei kulge samade välismõjude juures (või nende toime lõppemisel) esialgse üleminekuga sama faasitrajektoori pidi, vaid algse olukorra taastamiseks läheb vaja suuremat, vastupidise märgiga välismõju. Seejuures ei tarvitse tugeva häirituse korral esialgne süsteemiolek üldse taastuda ning üleminek ühelt stabiilselt olekult teisele osutub pöördumatuks [35].

Tunnusjooneks nimetatakse mingit tarbijat iseloomustavat parameetrit [40]. Tunnusjooneks võib näiteks olla seadme võimsus, kasutegur või nõutav töövool. Tunnusjoone esitamiseks tuleb läbi viia mõõtmised vastava seadme peal. Mõõtmiste käik vormistatakse tabelina, mille alusel joonestatakse graafik.

Kalibreerima tähendab täpsetele mõõtmetele vastavaks tegema või täpseid mõõtmel andma [29]. Näiteks kalibreeritud traat või polt tähendab traati või polti, mis on valmistatud kindlate

mõõtmatega. Anduri puhul tähendab see protsessi, kus kindlate tingimuste juures määratakse kindlaks seos mõõtevahendi näiduga.

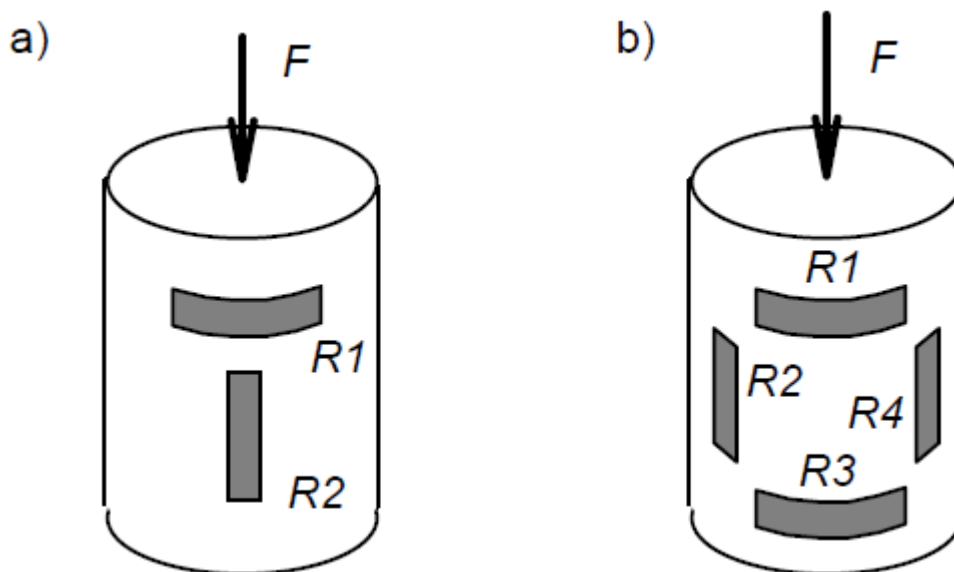
Anduritele esitatavad põhilised tehnilised nõudmised on järgmised [25]:

- Sisend- ja väljundsuuruste vahel peab olema ühene sõltuvus, see tähendab tunnusjoonel peab olema võimalikult väike hüsterees.
- Väljund peab sõltuma ainult mõõdetavast sisendist ja ei tohi sõltuda muudest signaalidest ega mõõtemürast.
- Väljundsuurus peab sõltuma sisendist võimalikult ühesuunaliselt.
- Anduril peab olema piisav tundlikkus ning tema tunnusjooned peavad olema ajaliselt püsivad.
- Anduri signaalid peavad olema suunatud toimega sisendist väljundisse ning vastassuunaline toime väljundist sisendisse peab olema minimaalne. See tähendab ka, et koormus ei tohi mõjutada oluliselt anduri tööd.
- Anduril peab olema suur toimekiirus, selleks et edastada signaali võimalikult õigeaegselt.
- Andur peab olema vastupidav keskkonnaoludele, sest seda pole võimalik kaitsta välistõjude eest.

Andurit, millega registreeritakse jõu suurust ning vastavust ettenähtule, nimetatakse jõuanduriks [3]. Jõudude mõõtmiseks kasutatakse kalibreeritud elastseid mehaanilisi primaar- ja sekundaarmuundureid. Järgmises punktis ongi täpsemalt käsitletuse all jõuanduri ehitus.

1.3 Jõuanduri ehitus

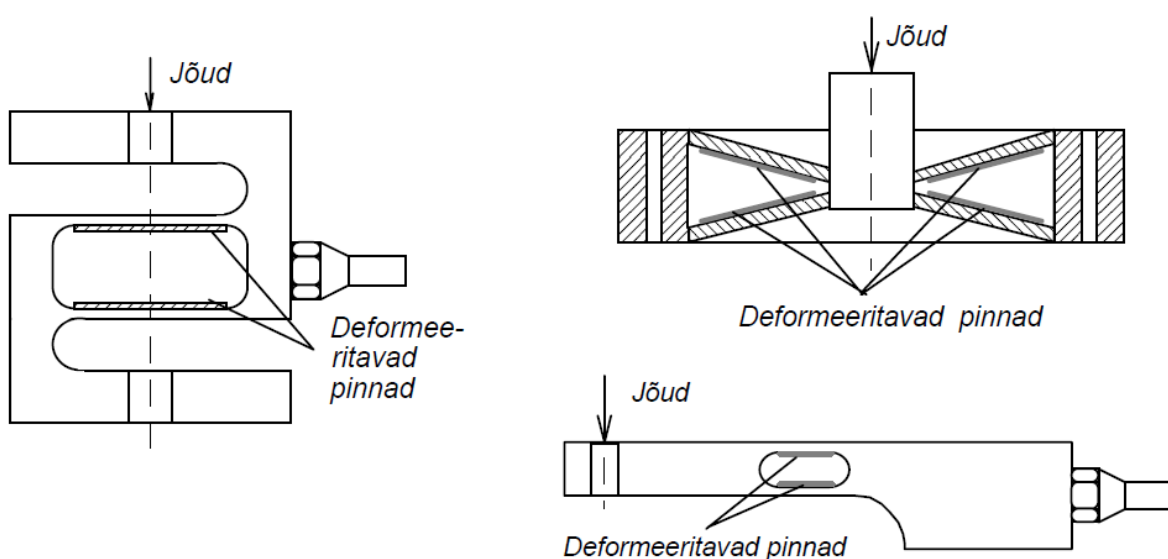
Jõu mõõtmiseks kasutatakse kalibreeritud elastseid mehaanilisi muundureid koos deformatsioonianduritega. Väikeste deformatsioonide mõõtmiseks sobivad mitmesugused tajurid, sealhulgas ka tensotajurid [25]. Joonisel 2 on näidatud tensotajurite asetus elastse silindri pinnal. Lükkejõu toimet silindri pikkus väheneb ja läbimõõt suureneb. Vastavalt sellele paigutatakse osa tensotajureid silindri telje suunas, osa aga sellega risti.



Joonis 2. Jõu mõõtmise tensotajuritega a) kahe tensotajuriga, b) nelja tensotajuriga [25]

Tsensotajurite selline paigutus silindris võimaldab mõõta takistuse muutumist tajuris kõige paremini. See omakorda võimaldab määrata mõjuva jõu suurust andurile võimalikult täpselt.

Jõuandurite ehitus sõltub selle kasutusotstarbest ning mõõdetava jõu suurusest. Joonisel 3 on näidatud mõne jõuanduri ehitus ja vastavad pinnad, mis mõjuvat jõudu mõõdavad. Pinda, mis mingi välismõju toimele muudab oma kuju, nimetatakse deformeeritavaks pinnaks. Näiteks kui deformeeruvale pinnale mõjub teatud suunaline jõud, siis see pind kas tõmbub kokku või venib välja.



Joonis 3 Jõuandurite konstruktsioonid [25]

Kõigil neil jõuanduritel on üks ühine omadus. Nimelt mõõdetakse kõigis jõuandurites elastse mõõtekeha (deformeeritava pinna) kuju muutust, kusjuures anduris on deformeeritavaid pindu, mis jõu toimet kokku surutakse ning pindu, mis sama jõu toimet välja venitatakse [16]. Tensotajurid, mille takistus muutub tajuri kuju muutumisel, kinnitatakse kindlalt deformeeritavatele pindadele [25]. Hiljem teisendatakse tajuri takistuse muutus jõu muutuseks.

Olles nüüd tutvunud füüsilise suurusega jõud, jõuanduri juures kasutatavate üldiste põhimõistega ning jõuanduri üldise ehituspõhimõttega, võtame käsitluse alla konkreetse Vernier jõuanduri. Järgmises punktis selgitataksegi LEGO MINDSTORMS NXT robotikakomplektiga ühilduva jõuanduri ehitust, tööpõhimõtet ja kasutamise võimalusi.

2. LEGO MINDSTORMS ja Vernier jõuandur

LEGO MINDSTORMS NXT on LEGO väljatöötatud õppevahend. Peaaegu igaüks meist on mänginud lego klotsidega ning valmistanud nendest asju kujutlusvõime piiramatus maailmas. NXT on programmeeritav LEGO robot, mis võimaldab juhtida mootorite ja tulede tööd ning töödelda anduritelt saadud infot. Joonisel 4 on kujutatud LEGO NXT roboti üks võimalikest kokkupandud versioonidest [21].



Joonis 4 *LEGO MINDSTORMS NXT robot* [23]

Lego klotsidest on võimalik ehitada mitmesuguseid erinevaid ülesandeid täitvaid roboteid. Täpsemalt, mida kõike LEGO MINDSTORMS komplektist ehitada on võimalik, saab vaadata Hitechnic kodulehelt [28]. Antud veebilehel on esitatud vastavad õpetused, kuidas vastavat robotit ehitada saab. Robootika kodulehelt saab näha ka huvitavat videot NXT robotite teatrist [39].

2.1 LEGO MINDSTORMS NXT roboti tutvustus

LEGO MINDSTORMS NXT komplekt tuli välja 2006. aastal, mis sisaldas endas 519 tehnilist osa, 3 mootorit, 4 andurit/sensorit (heliandur (mikrofon), puuteandur, valguse sensor ning kauguse andur(sonar)), 7 kaablit andurite ja mootorite ühendamiseks, USB kaabel ja NXT põhiplokk. Täpsemalt LEGO MINDSTORMS NXT roboti tutvustusest saab lugeda MTÜ Robootika kodulehelt [24].

Lisaks on komplektis ka LEGO MINDSTORMS NXT-G v2.0 – graafiline programmeerimisliides, mis võimaldab lihtsasti programme luua ning neid kiirelt NXT juhtimisblokki laadida ning seejärel proovida koostatud programmide töötamist. Eestikeelne õpetus antud programmist ja selle kasutamise võimalustest asub MTÜ Robootika kodulehel [22].

Selleks, et LEGO MINDSTORMS NXT robot suudaks vastu võtta andmeid teda ümbritsevast maailmast, peab ta välismaailmaga kuidagi suhtlema. Robot suhtleb välismaailmaga andurite kaudu, mis edastavad talle infot. LEGO MINDSTORMS NXT roboti külge on võimalik ühendada erinevaid andureid. Järgnev osa hakkabki põhjalikumalt kirjeldama LEGO MINDSTORMS NXT robotiga ühilduva Vernier jõuanduri ehitust ja tööpõhimõtet.

2.2 Vernier jõuanduri kirjeldus

Antud bakalaureusetöös käsitletav jõuandur on toodetud Ameerika Ühendriikide firma Vernier poolt. Vernier tegeleb lisaks mitmesuguste andurite tootmisele ka anduritega ühilduvate andmekogumisseadmete ning –tarkvara loomisega. Vernier jõuandur on jõu mõõtmiseks kasutatav seade (vt. joonis 5), millega saab määrata nii tõmbe- kui ka tõukejõudu. Andur on heaks asenduseks käsitsi jõu mõõtmiseks kasutavale njuutonmeetrile, mis näitab jõu suurust vedruskaalal, kuid njuutonmeeter ei võimalda mõõta tulemusi nii täpselt. Anduri võimaldab mõõta jõudu vahemikus 0,01 - 50 N [9].



Joonis 5. Vernier jõuandur [6]

Andurit on lihtne ja mugav kasutada ning seetõttu on see väga sobilik näiteks kooli õppeainetesse. Füüsikas omandatud teoreetilisi teadmisi saab järele proovida praktikas. Andur koosneb korpusest, mille küljes on juhe anduri ühendamiseks andmekogumisseadega (näiteks LEGO MINDSTORMS NXT põhiplokk), lülitist, mis võimaldab valida kahe erineva lülitusviisi vahel ning otsast, kuhu saab kinnitada erinevaid otsikuid. Läbi anduri on tehtud ava, mis võimaldab seda kinnitada umbes 13 mm paksuse toru külge. Anduri pikkus on 75 mm, laius 53 mm ning kõrgus 37 mm.

2.3 Vernier jõuanduri tööpõhimõte

Anduris oleva elastse keha väiksed deformatsiooni muudatused põhjustavad muudatusi pinges. See pinge muutus on proportsioonis jõu muutusega. See tähendab, et mida suuremat jõudu rakendatakse, seda rohkem pinge muutub. Nagu enamike seadmete puhul on ka selle anduri puhul rakendatud kompromiss jõu täpsuse ning rakendatava jõu suuruse vahel. Anduril on peal lüliti, mis võimaldab valida kahe režiimi vahel: $\pm 10\text{ N}$ ja $\pm 50\text{ N}$. Pluss ja miinus selles mõttes, et füüsikas tähistatakse kokkuleppeliselt tõmbejõudu plussmärgiga ning tõukejõudu miinusmärgiga. Kui andurile mõjub 10 N suurune tõmbejõud, siis öeldakse, et mõjuva jõu suuruseks on $+10\text{ N}$, kui aga andurile mõjub 10 N suurune tõukejõud, siis öeldakse, et mõjuva jõu suuruseks on -10 N . Lüliti režiimide erinevus seisneb mõõtmistäpsuses, kui lüliti on $\pm 10\text{ N}$ režiimis, siis on mõõtmistäpsuseks $0,01\text{ N}$, kui lüliti on

+50 N režiimis, siis on mõõtmistäpsuseks 0,05 N. Kui mõõdetava jõu suurus jääb alla 10 N, siis tuleks täpsuse huvides kasutada +-10 N lüliti asendit [8].

Mõõtmise teostamiseks tuleb andur ühendada vastava mõõtmist võimaldava seadmega. Seejärel viia läbi anduriga vastav katse soovitud jõu mõõtmiseks. Mõõtmistulemuste saamiseks genereerib andur jõu suurusele vastava pinge. Antud pinge teisendatakse meie lugemiseks sobivasse skaalasse, mis näitab jõu suurust njuutonites. Tulemusi on võimalik esitada ka graafiliselt, kus näidatakse jõu muutust ajas.

2.4 Vernier jõuanduri kasutamine

Andurit saab kasutada nii vertikaal-, horisontaalasendis kui ka kindla nurga all jõu mõõtmiseks. Joonisel 6 on näidatud 45-kraadise nurga all paigutatud jõuandur, mis mõõdab nõõrile mõjuvat tõmbejõudu.



Joonis 6. Vernier jõuandur kinnitatult 45-kraadise nurga all [19]

Keha liikumist saab iseloomustada suurusega, mida nimetatakse liikumishulgaks ehk impulsiks [13]. Impulsi tähtsuseks on p ja see on defineeritud keha massi (m) ja kiiruse (v) korrutisena. Impulsi suurus sõltub seega keha massist ja kiirusest. Nii tuleb sadamakai ehitada väga tugev, muidu purustaks selle ka üsna aeglaselt liikuv, kuid massiivne laev. Väike

püssikuul võib tekitada suuri purustusi oma suure kiiruse tõttu. Nii laeval kui ka kuulil on ühtviisi suur impulss.

Perioodiliseks liikumiseks nimetatakse sellist liikumist, mis kordub teatud kindla ajavahemiku ehk perioodi järel. Perioodiliste liikumiste hulka kuulub ka pöördliikumine ja ringliikumine [33]. Pöördliikumise korral ese (ehk: keha) pöörleb ümber oma telje, aga selle keha iga punkt tiirleb mööda ringjoont. Näiteks karussell pöörleb ja lapsed karussellil on pidevas ringliikumises.

Jõudu, mis tekib tahkete kehade kuju muutumisel, nimetatakse elastsusjõuks. Elastsusjõu suund on alati vastupidine mõjutava keha osakeste nihke suunale. Keha kuju muutuse põhjuseks on tema ühtede osade liikumine teiste osade suhtes. Kuju muutust nimetatakse elastseks, kui pärast välismõju lõppemist keha kuju taastub. Väikestel tõmbe- või survemuutustel kehtib *Hooke*'i seadus, mis ütleb, et keha kuju muutumisel tekkiv elastsujõud on võrdeline keha pikenemisega ja tema suund on vastupidine mõjutatava keha osakeste nihke suunale [10].

Antud jõuandurit saab kasutada erinevate eksperimentide puhul [8]:

1. Impulsi ja jõu omavaheliste seoste uurimiseks kehade kokkupõrke ajal
2. Perioodilise liikumise uurimiseks
3. Hõõrdejõu määramiseks
4. *Hooke*'i seaduse tundmaõppimiseks
5. Keha tõukejõu suuruse määramiseks
6. Liikuva keha jõu määramiseks
7. Jõu mõõtmiseks, mis on vaja kindla massiga keha liikumahakkamiseks

Huvitava video, kus mõõdetakse hõõrdejõudu lohistades puuklotsi mööda siledat ja lakitud puitlauda ning seejärel karedal puupakul, leiab Vernier kodulehelt [38]. Videos näidatud katsest on näha, et hõõrdejõu suurus sõltub palju sellest, mis pinnad omavahel kokku puutuvad.

2.5 Vernier jõuanduriga kaasasolevad komponendid

Vernier jõuanduriga on kaasas neli põhikomponenti: kruvi, konks, kummipuhver ning universaalne käepide. Järgnevalt on esitatud iga põhikomponendi kohta väike ülevaade ning kirjeldatud nende rolli anduri kasutamises. Tegelikult on võimalik juurde osta andurile veel teisi lisakomponente, aga kuna need pole põhikomplektiga kaasas, siis jätame need vaatluse alt välja.

Spetsiaalne kruvi võimaldab andurit kinnitada erinevate objektide külge, selleks et läbi viia erinevaid katseid. Joonisel 7 on näidatud, kuidas on võimalik jõuandurit kinnitada statiivi ja liikuva keha külge.



Joonis 7. Vernier jõuanduri kinnitamine kruviga statiivi ja teise keha külge [8]

Vertikaalselt statiivi külge kinnitatud jõuanduriga saab mõõta näiteks erinevatele kehadele mõjuvat raskusjõudu või jõudu, mis tekib keha võnkumisel mingi amplituudiga. Keha külge kinnitatud jõuandur võimaldab määrata jõudu, mis kulub selle keha liikuma- või seismajäämiseks.

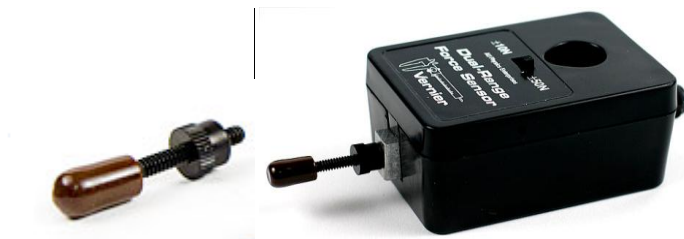
Vernier jõuanduriga kaasasolev konks käib keerates anduri otsiku külge (vt. joonis 8). Konksu küljes on spetsiaalne mutter, millega konks fikseeritakse, selleks et see ei hakkas seal vabalt ringi käima.



Joonis 8. Vernier jõuanduri konks [8]

Kasutades konksu, on hea kinnitada keha nööriga konksu külge ning mõõta sellele mõjuvat hõõrdejõudu libistamisel keha vastaval pinnal. Tulemused saab kajastada graafikul ning seejärel võrrelda missugune on erinevate pindade hõõrdetegur.

Kolmandaks anduriga kaasasolevaks komponendiks on kummipuhver, mis käib samuti keerates sellele mõeldud otsiku külge (vt joonis 9).



Joonis 9. Vernier jõuanduri kummipuhver [8]

Kummipuhvrit kasutades saab määrata näiteks liikuva keha jõudu, kui see sõidab otsa seisvale kehale või siis jõudu, mis tekib kahe liikuva keha kokkupõrkel. Saab katsetada kuivõrd sõltub liikuva keha jõud selle kiirusest.

Statiivkäepide kinnitatakse jõuanduri külge selleks ettenähtud pessa keerates, mis asub anduri otsiku vastasküljel (vt. joonis 10).



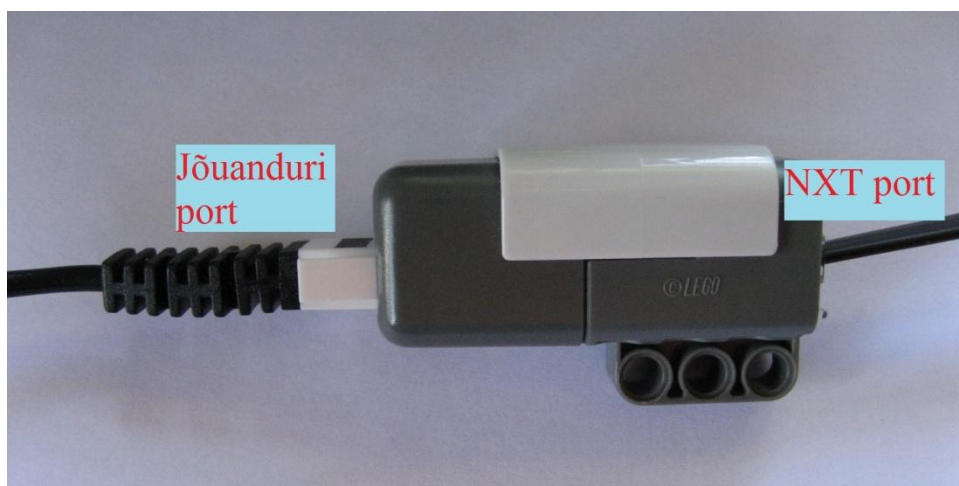
Joonis 10. Vernier jõuanduri käepide [8]

Nii on mugav hoida andurit käes ning sooritada erinevaid ülesandeid: määrata tõmbe-, raskus- või hõõrdejõudu.

Järgnevas osas selgitatakse Vernier jõuanduri kasutamist koos LEGO MINDSTORMS NXT komplektiga.

2.6 Vernier jõuanduri ühendamine LEGO MINDSTRMS NXT juhtplokkiga

Vernier firma andurid ühendatakse LEGO MINDSTORMS NXT juhtplokkiga spetsiaalse vaheadapteri abil, mida nimetatakse BTA adapteriks (vt joonis 11). BTA adapterist ühendatakse lego komplektiga kaasasolev juhe NXT juhtplokki. NXT juhtplokis on valida nelja erineva pordi vahel (juhtplokil tähistatud numbritega 1-4), kuhu saab ühendada erinevaid andureid.



Joonis 11. BTA adapter

Teostades vastavad ühendused, on võimalik omavahel ühendada NXT juhtplokki ja jõuandurit.

2.7 Vernier jõuanduri programmeerimine

Vernier jõuanduri programmeerimiseks saab kasutada Vernier firma poolt välja arendatud väga mitmeid tarkvaralahendusi. Need laboriseadmed ja tarkvarapakettid on laialdaselt õppetöös kasutusel mitmetes maailma riikide koolides, näiteks USA-s. Kuna aga antud bakalaureusetöö keskendub LEGO MINDSTORMS NXT robotikomplektile ja sellega ühendatavale Vernier jõuandurile, siis on käsitluse all Vernier jõuanduri programmeerimine LEGO MINDSTORMS NXT-G v2.0 graafilises keskkonnas. Rohkem infot teiste tarkvarapakettide ja andmekogumisseadeldiste kohta saab Vernier kodulehelt, kust tuleb

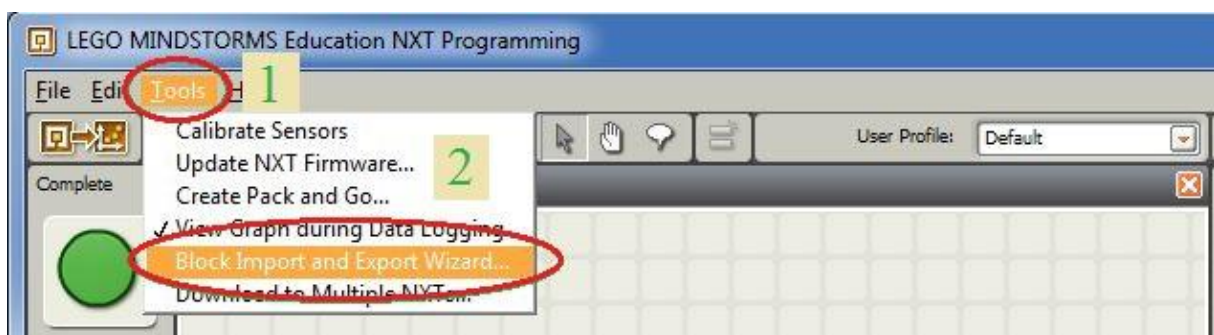
kõigepealt liikuda toodete lehele (ingl.k *Products*) ning seejärel klikkida tarkvara tutvustavale lingile (ingl.k *Software*) või andmekogumisseadmete lingile (ingl.k *Interfaces*) [37]. Järgnevalt tuleb juttu LEGO MINDSTORMS NXT-G v2.0 tarkvarast selle ühilduvusest Vernier andurite plokiga.

2.7.1 Vernier andurite ploki importimine LEGO MINDSTORMS NXT-G v2.0 keskkonda

LEGO MINDSTORMS NXT-G on LEGO NXT robotite programmeerimiseks LEGO ning tarkvaratootja National Instruments koostöös välja töötatud graafiline programmeerimiskeskond, mis sobib eelkõige just algajatele robotite programmeerimise õpetamiseks. Programmeerimine toimub ikoonide abil. Programm moodustub omavahel juhtmega ühendatud, üksteise järele asetatud ikoonidest. Rohkem infot antud programmi kasutamisest ja tutvustusest leiab Robootika kodulehelt [22].

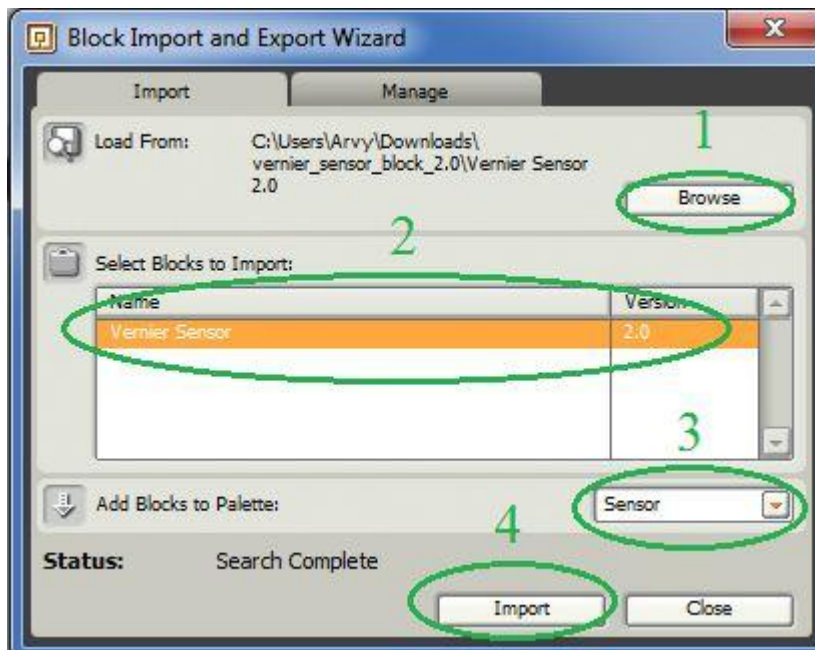
LEGO MINDSTORMS NXT tarkvarapaketi installeerimisel arvutisse ei ole algses paketis sees Vernier andurite ploki. Vastav plokk tuleb eelnevalt Vernier kodulehelt alla laadida ning seejärel NXT-G programmi importida. Allalaadimisel tuleb kodulehel olevast loetelust valida *Vernier Sensor Block – version 2.0* [11]. Pakett on ZIP formaadis ning tuleb eelnevalt lahti pakkida.

Ploki importimiseks tuleb käivitada NXT-G programm ning ülevalt menüü ribalt valida „Tools“, avanenud loetelust klikkida „Block Import and Export Wizard“ peale (vt. joonis 12).



Joonis 12. Vernier andurite ploki importimine

Avanenedes aknas tuleb klikkida nupule „Browse“ (vt. joonis 13) ning valida vastav kaust, kuhu eelnevalt Vernier andurite lisaplokk lahti pakiti. Edasi märkida aktiivseks „Vernier Sensor“ ja *Add Blocks to Palette* alt teha valik „Sensor“. Kui kõik eelnevalt kirjeldatud sammud on tehtud, siis vajutada nupule „Import“ [36].

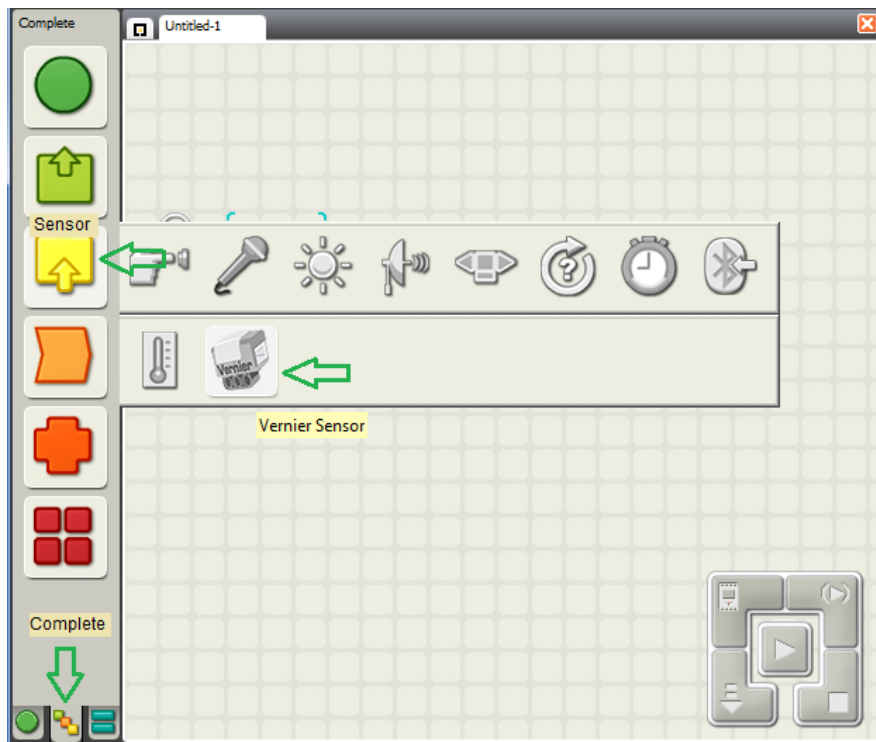


Joonis 13. Importimiseks vajalikud tehtavad valikud

Kui importimine sooritatud, siis nüüd on võimalik kasutada LEGO NXT graafilises keskkonnas ka Vernier andurite plokki. Antud plokk on leitav teiste andurite hulgast. Järgnevalt tulebki täpsemalt juttu jõuanduri plokist ja selle programmeerimisest.

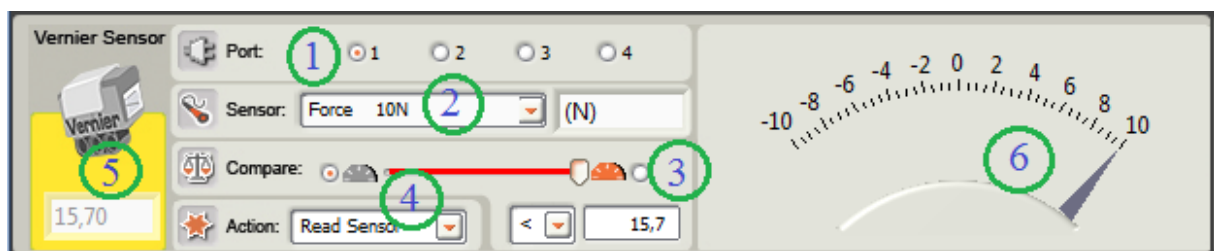
2.7.2 LEGO MINDSTORMS NXT-G jõuanduri plokk

Vernier andurite plokk on LEGO MINDSTORMS NXT-G graafilisele programmeerimiskeskkonnale lisatav plokk, mis võimaldab kasutada ja programmeerida Vernier firma poolt toodetud erinevaid andureid. Anduri leiab liikudes programmi vasakus servas asuvalle „Complete“ menüüle, sealt edasi valida „Sensor“ ning andurite loetelu alt „Vernier Sensor“ (vt joonis 14).



Joonis 14. Vernier anduri asukoht

Vastava anduri ploki avamisel ning aktiivseks tegemisel ilmub alla vasakusse serva anduri seadistamise menüü (vt joonis 15). Sealt saab muuta mitmeid anduri seadistusi ning leida informatsiooni anduri kohta.



Joonis 15. Vernier anduri menüüriba

Vernier anduri seadistamise menüü (vt. joonisel 15 numbrid 1-6):

1. Tähistab porti numbrit, kuhu andur on NXT juhtplokis ühendatud. Antud näite puhul on jõuandur ühendatud porti number 1.
2. Avamisel tuleb ette rippmenüü, kust saab valida millise Vernier anduriga on tegu. Hetkel on valikus jõuandur mõõtmisvahemikuga $\pm 10\text{N}$. Järgmises lahtris näidatakse ära ka mõõtühik, milles konkreetset füüsikalist suurust mõõdetakse.

3. *Compare* - võimaldab sooritada võrdluseid. Liuguri abil saab seadistada päästikväärtuse. Sõltuvalt väärtusest võib saada loogilise väärtuse õige/vale. Tehes aktiivseks liugurist vasakul pool asuva nupu, on tõseks väärtuseks kõik väärtused, mis on suuremad kui päästikväärtus ja vääraks kõik väärtused, mis on väiksemad kui päästikväärtus. Tehes aktiivseks liuguri paremal pool asuva nupu, on tõseks väärtuseks kõik väärtused, mis on väiksemad kui päästikväärtus ja vääraks kõik väärtused, mis on suuremad kui etteantud väärtus. Näiteks kui meil on päästikväärtuseks valitud 15,7 N ja aktiivne vasak nupp (tähendab tähist väiksem “<”), siis kõik jõuanduri mõõdetud väärtused, mis on suuremad kui 15,7 N, on tõesed ning kõik jõuanduri mõõdetud väärtused, mis on väiksemad kui 15,7 N, on väärad.
4. *Action* ehk tegevus – võimaldab valida kolme tegevuse vahel:
 1. *Read Sensor* – vaikimisi väärtus, mille puhul väljastatakse sensori mõõdetav tulemus.
 2. *Zero/Calibrate* – valik anduri kalibreerimiseks. Võimaldab nullida anduri hetkeväärtuse katse algul, kui sellele on juba mingi jõud rakendatud.
 3. *Reset* - valik standardkalibratsiooni taastamiseks.
5. Aken, kui näidatakse anduri poolt mõõdetavat väärtust reaajas, siis kui see on ühendatud arvutiga.
6. Skaala, millel näidatakse anduri poolt mõõdetavat väärtust reaajas, siis kui see on ühendatud arvutiga.

Kui Vernier anduri plokk on lisatud programmeeritavasse faili, siis saab esile kutsuda ka rippmenüüd, vajutades anduri alumisele ribale. Rippmenüül asuvad erinevad sisendid ja väljundid (vt joonis 16). Vastavatesse sisenditesse ja väljunditesse on võimalik juhtmete abil teostada erinevaid loogikaühendusi ja koostada programme, mis täidavad vastavaid ülesandeid. Meeles tuleb pidada, et ühenduste puhul omavad eri värvi juhtmed erinevaid tähendusi. Halli värvi juhe tähendab seda, et midagi on omavahel valesti ühendatud. Näiteks pole võimalik omavahel ühendada teksti ja numbrit, kuna need on erinevad andmetüübid. Teksti juhtmed on punast värvi, arvude edastamiseks kasutatakse kollast värvi juhet ning rohelist värvi juhe edastab loogilist väärtust (tõene/väär) [22].



Joonis 16. Vernier anduri rippmenüü

Jõuanduri võimalikud sisendid ja väljundid on (vt. joonisel 16 numbrid 1-8):

1. Pordi number NXT juhtimisblokil, kuhu jõuandur ühendatud on.
2. Näitab teostatavat tegevust (nt ühenduse loomine jõuanduriga).
3. Väärtus, millega lugemit võrrelda.
4. Võrdlus (suurem/väiksem).
5. Võrdluse tulemus (seda väärtust mõjutab eelmine sisend).
6. NXT juhtimisbloki poolt sisse loetud mõõtetulemus.
7. Mõõdetud väärtus numbrilises väärtuses.
8. Mõõdetud väärtus tekstina.

Järgmises punktis on võimalik eelnevalt läbitöötatud materjali põhjal lahendada erinevate raskusastmetega ülesandeid.

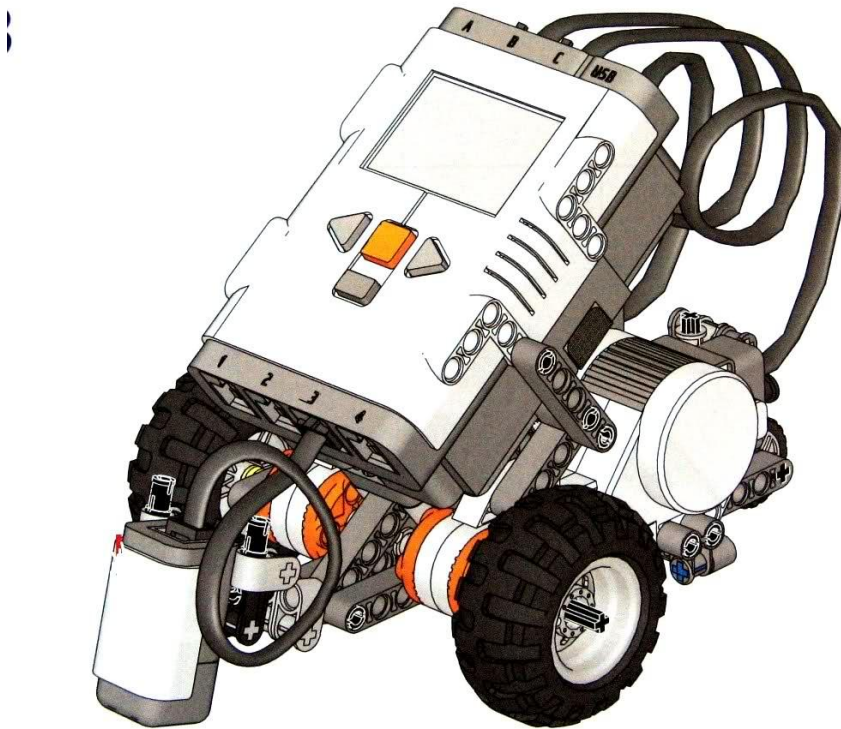
3. Ülesanded

Käesolevas peatükis on koostatud ülesanded, mida Vernier jõuandurit kasutades on võimalik lahendada. Ülesanded on erineva raskusastmega, alustades kergematest ja lõpetades raskematega. Algtaseme juures on lähtutud lihtsatest mõõtmise toimingutest ning minimaalsest programmeerimise vajadusest. Järgmised tasemed nõuavad juba rohkem programmeerimise ja loogika elementide kasutamist.

Kõik ülesanded on kirja pandud kindla struktuuri järgi. See lihtsustab erinevatest bakalaureusetöödest ülesannete kokkupanemist ja kasutamist õppematerjalina. Iga ülesanne koosneb järgmistest osadest:

- Tase – näitab millise keerukusega ülesandega on tegu.
- Eesmärk – kirjeldab, mida antud ülesande lahenduse käigus õpitakse.
- Vajalikud vahendid ja teadmised – kirjeldab, milliseid vahendeid ja eelteadmisi on ülesande lahendamiseks vaja.
- Ülesande püstitus – määrab ära ülesande tingimused ning kirjeldab, mida oodatakse lahenduseks.
- Lahenduse idee – annab juhiseid, kuidas konkreetset ülesannet tuleks lahendada.
- Lahendus – selles osas on esitatud üks ülesande võimalikest lahendusvariantidest. Ülesanded on lahendatud LEGO MINDSTORMS NXT-G v2.0 keskkonnas ja ülesannete lahendusfailid asuvad käesoleva bakalaureusetöö lisas oleva CD plaadi peal.
- Märkused – kirjeldab erinevaid probleeme, mis ülesande lahendamise käigus võivad esile kerkida, ning annab soovitusi nende vältimiseks. Samuti võib siin olla ka lisainformatsiooni konkreetse ülesande kohta.

Ülesannete lahendamiseks on kasutatud LEGO robotit, mille ehitusjuhendi leiab LEGO MINDSTORMS NXT standardkomplektist (vt. joonis 17).



Joonis 17. LEGO MINDSTORMS NXT komplekti üks võimalikest roboti ehitamise versioonidest

Ülesandeid ei pea tingimata lahendama täpselt samasuguse robotiga.

3.1 Ülesanne 1 - Mobiiltelefonile mõjuva raskusjõu määramine

Tase: Kerge, sobib neile, kes alles alustavad tutvumist antud anduriga ja ei oma vastavat kogemust programmeerimises.

Eesmärk: Ülesande eesmärgiks on ühendada jõuandur arvuti külge ning määrata seeläbi raskusjõu suurus ning kuvada see NXT ekraanile.

Vajalikud vahendid/teadmised:

- arvuti koos LEGO MINDSTORMS NXT-G programmiga, kuhu on ka Vernier andurite lisaplokk imporditud
- NXT robot ja selle külge vastava BTA liidese abil ühendatud Vernier jõuandur
- mobiiltelefon
- nõõrijupp mobiiltelefoni riputamiseks jõuanduri konksu otsa

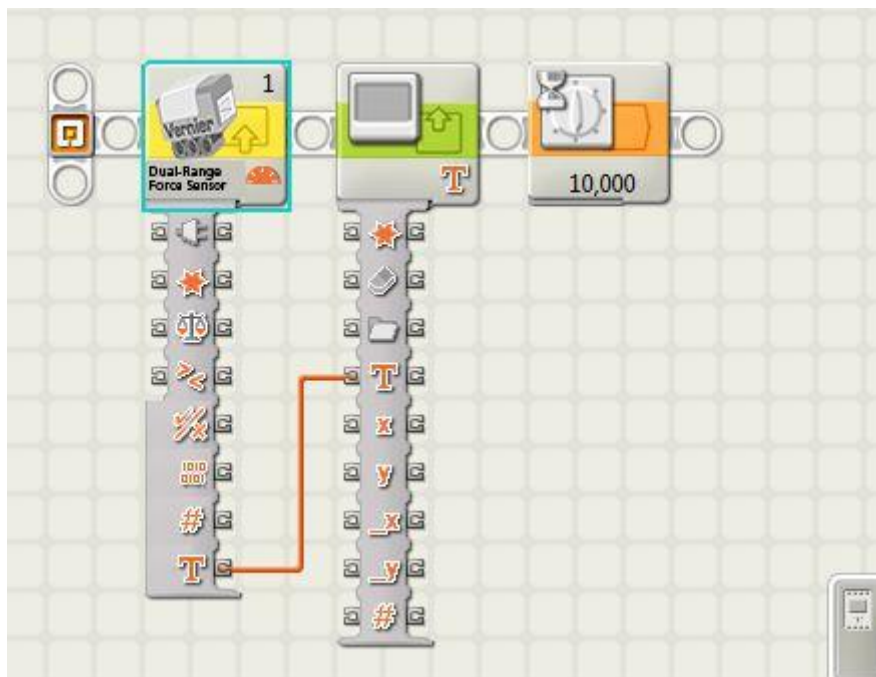
- Vajalikeks eelteadmisteks on raskusjõu arvutamise valem $F_r = m \cdot g$, kus m = keha mass (kg) ning g = raskuskiirendus (Maal $9,8 \text{ m/s}^2$)

Ülesande püstitus: Määra, kui suur raskusjõud mõjub mobiiltelefoni riputamisel jõuanduri konksu otsa.

Lahenduse idee: Kõigepealt tuleb koostada lihtne programm, mis kuvaks mõõdetud näidu ekraanil. Seejärel riputada jõuanduri konksu otsa telefon ning käivitada antud programm. Lugeda ekraanilt raskusjõu suurus.

Üks võimalik lahendus: Ühendada jõuandur NXT juhtimisploki külge. Luua ühendus juhtimisploki ja arvuti vahel kasutades selleks graafilist programmi LEGO MINDSTORMS NXT-G. Kui juhtimisploki ja arvuti vahel on ühendus saavutatud ning anduri näitu on võimalik programmist lugeda, siis riputada telefon jõuanduri konksu otsa ning laadida koostatud programm NXT juhtimisplokki ning seal see käivitada. Tulemus kuvatakse NXT ekraanile.

Joonisel 18 on kujutatud üks võimalik programm, mis võimaldab lugeda jõuanduri näitu ning kuvab selle 10-ks sekundiks NXT ekraanile. Antud programmi koostamiseks tuleb menüüst valida Vernier andur (vt joonis 14). Vernier anduri menüüribalt (vt. joonis 15) tuleb andur seadistada mõõtmajõudu $\pm 10 \text{ N}$. Seejärel ühendada Vernier anduri rippmenüül (vt. joonis 16) tekstina esitatud väärtus ekraaniploki tekstilise sisendiga, mis kuvab tulemuse tekstina ekraanil. Lisaks tuleb lõppu lisada ootamise plokk, et tulemus ei kaoks kohe ekraanilt ning et seda oleks võimalik lugeda. Seadistada ootamise plokk näiteks 10 sekundi peale.



Joonis 18. Üks võimalik programm, mis mõõdab jõu suuruse ning kuvab selle 10-ks sekundiks NXT ekraanile.

Ülesande lahendusfail asub lisana kaasasoleval CD plaadil ylesanne4_raskusj6ud.rbt faili nime all.

Märkused: Ülesande lahendamiseks ei ole vaja LEGO MINDSTORMS NXT robotit täielikult, piisab ka ainult juhtimisplokist, millega jõuandur ühendatud on.

3.2 Ülesanne 2 - Mobiiltelefonile mõjuva hõõrdejõu määramine

Tase: Kerge, sobib neile, kes alles alustavad tutvumist antud anduriga ja ei oma vastavat kogemust programmeerimises ning oskavad leida raskus- ja hõõrdejõudu.

Eesmärk: Ülesande eesmärgiks on ühendada jõuandur arvuti külge ning määrata seeläbi hõõrdejõu suurus ning kuvada see ekraanile.

Vajalikud vahendid/teadmised:

- arvuti koos LEGO MINDSTORMS NXT-G programmiga, kuhu on ka Vernier andurite lisaplokk imporditud
- NXT juhtplokk ja selle külge vastava BTA liidese abil ühendatud Vernier jõuandur

- mobiiltelefon
- nöörijupe mobiiltelefoni libistamiseks mööda lauda
- Vajalikeks eelteadmisteks on hõõrdejõu arvutamise valem tasapinna puhul ($F_h = m \cdot g \cdot \mu$) ja raskusjõu arvutamise valem ($F_r = m \cdot g$)

Ülesande püstitus: Leia hõõrdeteguri väärtus mobiiltelefoni libistamisel mööda lauda.

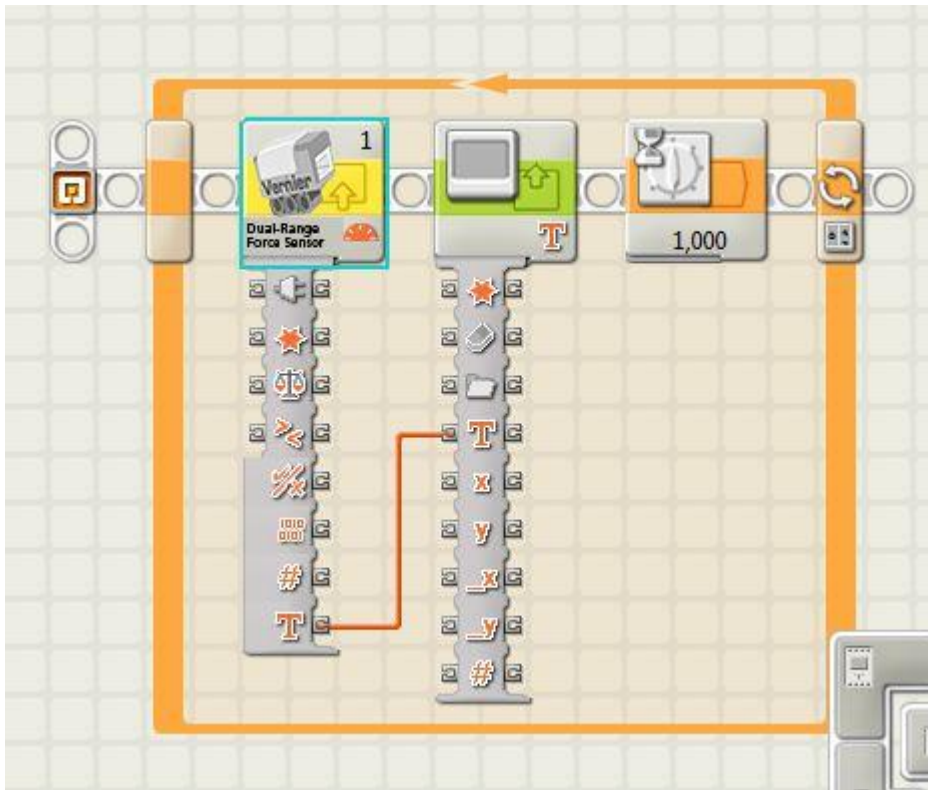
Lahenduse idee: Kõigepealt määrata jõuanduriga telefonile mõjuv raskusjõud telefoni riputamisel jõuanduri konksu otsa. Seejärel määrata jõuanduriga telefonile mõjuv hõõrdejõud telefoni libistamisel mööda lauda.

Üks võimalik lahendus: Valemist $F_h = m \cdot g \cdot \mu$ (kus F_h on hõõrdejõud, m - keha mass, g – raskuskiirendus Maal $9,8 \text{ m/s}^2$, μ – hõõrdetegur (müü), saab tuletada valemi $F_h = F_r \cdot \mu$, kus F_r on raskusjõud. Raskusjõu arvutamise valemiks on $F_r = m \cdot g$. Nüüd tuleb valemist $F_h = F_r \cdot \mu$ avaldada hõõrdetegur μ . $F_h = F_r \cdot \mu \rightarrow \mu = F_h / F_r$. Siit näeme, et hõõrdeteguri leidmiseks on vaja leida keha raskus- ja hõõrdejõud. Edasi tuleb teostada Vernier jõuanduriga vastavad mõõtmised.

Ühendada jõuandur NXT juhtploki külge. Luua ühendus juhtploki ja arvuti vahel kasutades selleks graafilist programmi LEGO MINDSTORMS NXT-G. Koostada programm, mis loeb sisse jõuanduri näidu ning kuvab selle NXT ekraanile. Kui jõuanduri ja arvuti vahel on ühendus saavutatud ning anduri näitu on võimalik programmist lugeda, siis laadida koostatud programm NXT juhtimisplokki. Riputada telefon jõuanduri konksu otsa ja käivitada programm ning vaadata ekraanilt raskusjõu F_r suurst. Seejärel libistada mobiiltelefoni mööda lauda ning vaadata arvutist hõõrdejõu F_h suurst.

Vaatame lähemalt ühte võimalikku ülesande lahendamise programmi (vt. joonis 19). See on sarnane eelmise ülesande lahendusele, kuid sisse on toodud tsükkel, mis kordab mõõtmistulemust, selleks et hõõrdejõu mõõtmistulemus saada võimalikult täpne. Kõigepealt koostada tsükkel, mis kordab mõõtmistulemust näiteks 10 korda. Kõik järgnevad tegevused viia läbi selle tsükli sees. Järgmisena tuleb menüüst valida Vernier andur (vt joonis 14). Vernier anduri menüüribalt (vt. joonis 15) tuleb andur seadistada mõõtma jõudu $\pm 10 \text{ N}$. Seejärel ühendada Vernier anduri rippmenüül (vt. joonis 16) tekstina esitatud väärtus ekraaniploki tekstilise sisendiga, mis kuvab tulemuse tekstina ekraanil. Lisaks tuleb lõpu

lisada ootamise plokk, et tulemus ei kaoks kohe ekraanilt ning et seda oleks võimalik lugeda. Seadistada ootamise plokk näiteks ühe sekundi peale.



Joonis 19. Üks võimalik programm, mis mõõdab vastava jõu suuruse ning kuvab selle üheks sekundiks NXT ekraanile ning kordab protseduuri 10 korda.

Nüüd on võimalik leida hõõrdeteguri väärtus jagades hõõrdejõu suuruse raskusjõu suurusega ($\mu = F_h / F_r$).

Ülesande lahendusfail asub lisana kaasasoleval CD plaadil ylesane2_h66rdej6ud.rbt faili nime all.

Märkused: Ülesande lahendamiseks ei ole vaja LEGO MINDSTORMS NXT robotit täielikult, piisab ka ainult juhtimisplakist, millega jõuandur ühendatud on. Mobiiltelefoni asemel võib kasutada libistamiseks ka mõnda muud keha.

3.3 Ülesanne 3 - NXT roboti tõmbejõu määramine

Tase: Keskmine, sobib neile, kes omavad juba mingisugust kasutamise ja programmeerimise kogemust jõuanduriga.

Eesmärk: Koostada NXT programm graafilises keskkonnas, laadida see NXT juhtimisplokki ning käivitada. Ülesande eesmärgiks on määrata, millist tõmbejõudu on LEGO MINDSTORMS NXT robot võimeline arendama.

Vajalikud vahendid/teadmised:

- Arvuti koos LEGO MINDSTORMS NXT-G programmiga, kuhu on ka Vernier andurite lisaplokk imporditud
- NXT robot ja selle külge vastava liidese abil ühendatud Vernier jõuandur
- Kumm (NXT roboti ja tõmmatava objekti omavaheliseks ühendamiseks). Tõmmatav objekt ei tohi tõmbamisel paigast liikuda
- Vajalikuks eelteadmiseks on LEGO MINDSTORMS NXT-G programmi kasutamise oskus vähemalt algtasemel

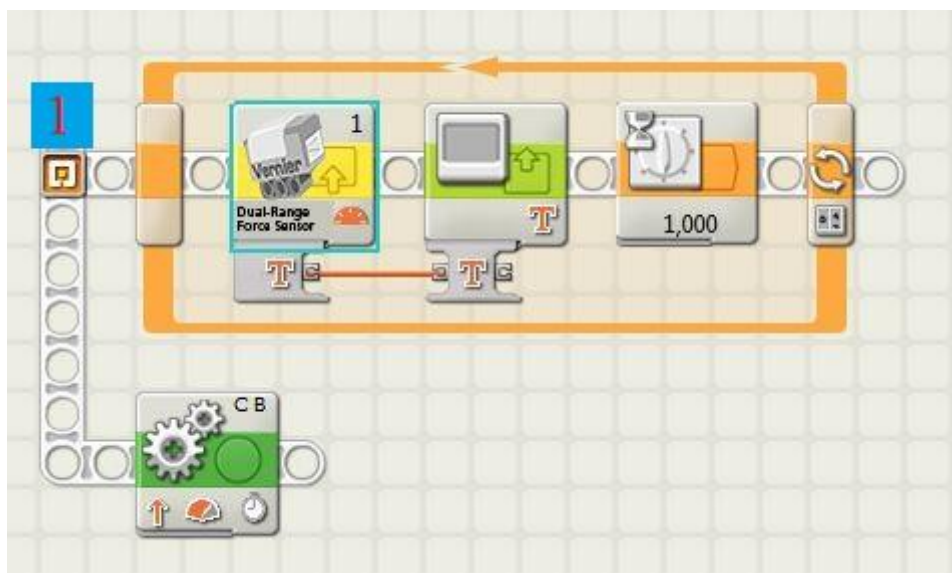
Ülesande püstitus: Leida tõmbejõu väärtus LEGO MINDSTORMS NXT roboti tõmbamisel mingit objekti, mis on kinnitatud millegi külge või on piisavalt raske ning ei liigu tõmbamisel paigast.

Lahenduse idee: Koostada programm, mis sõidab 8 sekundit edasi ning samal ajal loeb sisse jõuanduri näidu ning kuvab selle NXT ekraanile iga ühe sekundi järel. Kui jõuanduri ja arvuti vahel on ühendus saavutatud ning anduri näitu on võimalik programmist lugeda, siis laadida koostatud programm NXT juhtimisplokki. Seejärel ühendada kummiga LEGO MINDSTORMS NXT robot koos pealoleva jõuanduriga tõmmatava objektiga. Panna robot sõitama, nii et see tõmbaks jõuanduri külge kinnitatud kummi. Samal ajal kuvada tõmbejõu näit NXT ekraanile.

Üks võimalik lahendus: Ühendada jõuandur NXT juhtploki külge. Luua ühendus juhtploki ja arvuti vahel kasutades selleks graafilist programmi LEGO MINDSTORMS NXT-G.

Vaatame lähemalt ühte võimalikku ülesande lahendamise programmi (vt. joonis 20). See on sarnane 3.2 ülesande lahendusele, kuid sisse on lisaks toodud hargnemine. See tähendab seda,

et robot sõidab edasi ning samal ajal loetakse sisse ja näidatakse ka jõuanduri näitu NXT ekraanil. Kõigepealt koostada tsükkel, mis kordab mõõtmistulemust näiteks 10 korda. Kõik järgnevad tegevused viia läbi selle tsükli sees. Järgmisena tuleb menüüst valida Vernier andur (vt joonis 14). Vernier anduri menüüribalt (vt. joonis 15) tuleb andur seadistada mõõtma jõudu ± 10 N. Seejärel ühendada Vernier anduri rippmenüül (vt. joonis 16) tekstina esitatud väärtus ekraaniploki tekstilise sisendiga, mis kuvab tulemuse tekstina ekraanil. Lisaks tuleb lõpu lisada ootamise plokk, et tulemus ei kaoks kohe ekraanilt ning et seda oleks võimalik lugeda. Seadistada ootamise plokk näiteks ühe sekundi peale. Tsüklist väljaspoole lisada programmi liikumise plokk ning ühendada see programmi alguspunktiga (vt. joonis 20 (1- alguspunkt)). Seadistada liikumise plokk sõitma 8 sekundit otse edasi.



Joonis 20. Üks võimalik programm, mis sõidab 8 sekundit edasi ning samal ajal loeb sisse jõuanduri näidu ning kuvab selle NXT ekraanile. Mõõtmistsükli korratakse 10 korda ning tulemus uuendatakse ekraanil iga sekundi tagant.

Ülesande lahendusfail asub lisana kaasasoleval CD plaadil ylesanne3_t6mbej6ud.rbt faili nime all.

Märkused: NXT roboti koos jõuanduriga (ühte võimalikku kinnitusviis jõuanduri kinnitamiseks roboti külge saab näha jooniselt 21, kus kummipuhvri asemel tuleb kasutada konksu). võib kummiga ühendada näiteks toolijala külge. Mida libedam põrand, seda väiksem on tõmbejõud, kuna haakuvus (hõõrdetegur) pinna ja roboti rataste vahel on väiksem ning rattad hakkavad kergemini ringi käima. Roboti võib seadistada ka pikemalt edasi sõitma

ning mõõtmistsükklite arvu võib samuti vastavalt soovile muuta. Antud bakalaureusetöö raames on tehtud ka selle programmi järgi töötavast NXT robotist video, mis asub tööga kaasasoleval CD plaadil ylesanne3_t6mbej6ud.wmv faili nime all.

3.4 Ülesanne 4 - Loendur

Tase: Keskmine, sobib neile, kes omavad juba mingisugust kasutamise ja programmeerimise kogemust jõuanduriga.

Eesmärk: Ülesande eesmärgiks loogika- ja aritmeetikatehete kaudu määrata, mitu korda NXT robot sõitis vastu takistust.

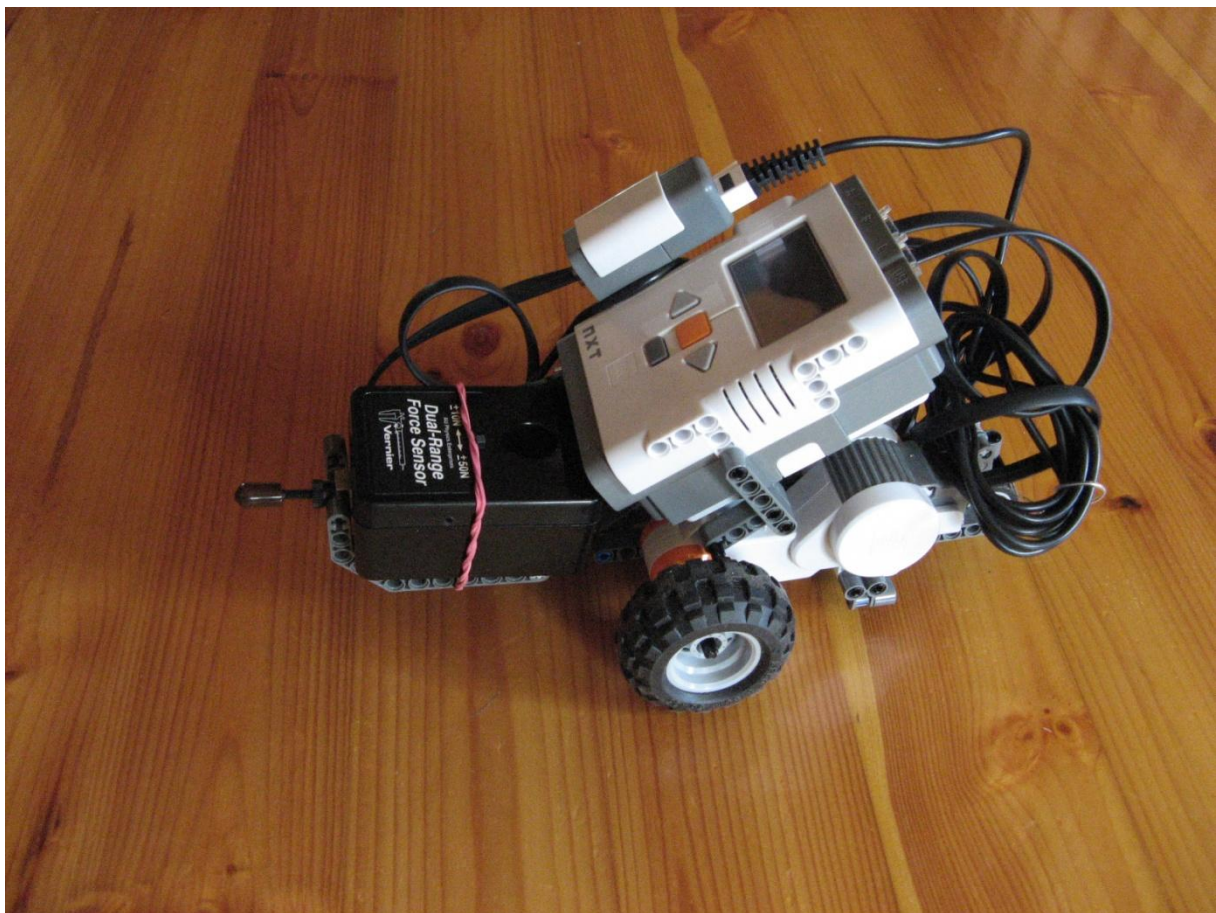
Vajalikud vahendid/teadmised:

- Arvuti koos LEGO MINDSTORMS NXT-G programmiga, kuhu on ka Vernier andurite lisaplokk imporditud
- NXT robot ja selle külge vastava BTA liidese abil ühendatud Vernier jõuandur
- Kumm (jõuanduri ja NXT roboti omavaheliseks kinnitamiseks)
- Vajalikuks eelteadmiseks on LEGO MINDSTORMS NXT-G programmi kasutamise oskus

Ülesande püstitus: Koostada NXT programm kasutades jõuanduri plokki, mis sõidab edasi, takistusega kokkupõrkel keerab robot ringi ning sõidab teises suunas edasi. Samal ajal loetakse mitu korda sõidetud aja jooksul kokku pörgati.

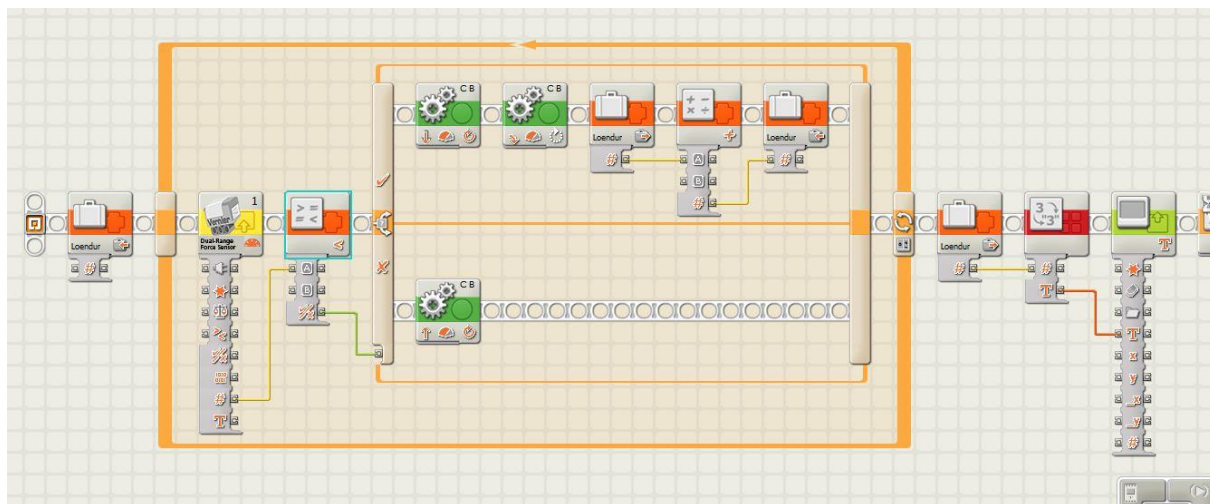
Lahenduse idee: Programmi tuleb sisse tuua muutuja, mis loendab takistusega kokkupõrgete arvu. Samuti ka võrdluselement, mis võrdleb jõuanduri tulemust etteantud kindla arvuga. Kui mõõdetud jõuanduri näit on väiksem, kui etteantud arv, siis keerab robot ringi ja sõidab teises suunas edasi. Kui mõõdetud jõuanduri näit ei ole väiksem, kui etteantud arv, sõidab robot samas suunas edasi.

Üks võimalik lahendus: Ühendada jõuandur NXT juhtploki külge. Luua ühendus juhtploki ja arvuti vahel kasutades selleks graafilist programmi LEGO MINDSTORMS NXT-G. Kinnitada jõuandur roboti külge. Ühte võimalikku kinnitusviisi saab näha jooniselt 21. Vernier anduri menüüribalt (vt. joonis 15) tuleb andur seadistada mõõdma jõudu ± 10 N. Samuti ka anduri peal olev lüliti panna asendisse ± 10 N.



Joonis 21. NXT roboti külge kinnitatud jõuandur

Vaatame lähemalt ühte võimalikku ülesande lahendamise programmi (vt. joonis 22). Lahendusest on näha, et loodud on uus muutuja nimega „Loendur“, mis hoiab takistusega kokkupõrgete arvu. Uue muutuja loomine käib ülevalt menüüst „Edit“ alt. Sealt tuleb valida „Define Variables“. Avanenud aknas saab „Create“ nupuga luua uusi muutujaid. Antud ülesande juures on oluline, et muutuja „Datatype“ oleks number. Kasutatud on võrdlusplokki, kus üheks sisendväärtuseks on jõuandurilt loetud näit ja teiseks väärtuseks on null. Kui jõuanduri näit on väiksem, kui null (see tähendab, et robot on sõitnud millegi vastu ning jõuandurile mõjub lükkejõud, mis on negatiivse väärtusega), siis robot sõidab ühe rattapöörde tagasi ning keerab ringi. Samuti suurendatakse ka muutuja „Loendur“ väärtust ühe võrra. Kui jõuanduri näit ei ole nullist väiksem, siis sõidetakse ühe rattapöörde võrra jälle edasi. Tsüklit korratakse 30 korda. Seejärel teisendatakse muutuja „Loendur“ tekstiks ning väljastatakse viieks sekundiks ekraanile.



Joonis 22. Programm, kus loetakse sisse jõuanduri näit, võrreldakse seda etteantud tulemusega. Kui mõõdetud jõuanduri näit on väiksem, kui etteantud väärtus, siis keerab robot ringi ja sõidab teises suunas edasi. Kui mõõdetud jõuanduri näit pole väiksem etteantud väärtusest, siis sõidetakse otse edasi. Samuti loendatakse mitu korda takistusega sõidetud aja jooksul kokku põrgati.

Ülesande lahendusfail asub lisana kaasasoleval CD plaadil ylesanne4_loendur.rbt faili nime all.

Märkused: Kui võrdlusplokki puhul võrdlemine jõuanduri mõõdetud näiduga ja nulliga ei tööta korrektselt, siis võib kasutada nulli asemel natuke nullist erinevat positiivset arvu, näiteks 0,1 või 0,3. Antud bakalaureusetöö raames on tehtud ka selle programmi järgi töötavast NXT robotist video, mis asub tööga kaasasoleval CD plaadil ylesanne4_loendur.wmv faili nime all.

3.5 Ülesanne 5 - NXT roboti seinaga kokkupõrkejõu arvutamine

Tase: Keeruline, sobib neile, kes juba omavad kogemust programmeerimisest ja loogikatehetest ning tingimustest.

Eesmärk: Ülesande eesmärgiks on programmeerida NXT robot näitama põrkejõu suurust seinaga kokkupõrkel ning õppida kasutama loogikatehteid.

Vajalikud vahendid/teadmised:

- Arvuti koos LEGO MINDSTORMS NXT-G programmiga, kuhu on ka Vernier andurite lisaplokk imporditud
- NXT robot ja selle külge vastava BTA liidese abil ühendatud Vernier jõuandur
- Kumm (jõuanduri ja NXT roboti omavaheliseks kinnitamiseks)
- Vajalikuks eelteadmiseks on LEGO MINDSTORMS NXT-G programmi kasutamise oskus

Ülesande püstitus: Koostada programm, kus robot sõidab kaks korda edasi-tagasi ning samal ajal mõõdab kogu aeg mõjuva jõu suurust ning võrdleb seda eelneva mõõdetud tulemusega. Kui tulemus on väiksem, siis vahetatakse uus mõõdetud tulemus vanaga ära. Lõpus väljastatakse NXT ekraanile kõige väiksem tulemus ehk seinaga kokkupõrkel mõõdetud jõu suurus (väikseim sellepärast, füüsikas tähistatakse lükkejõu väärtust kokkuleppeliselt miinusmärgiga).

Lahenduse idee: Programmi tuleb sisse tuua muutuja, mis hoiab jõuanduri mõõdetud vähimat väärtust. Samuti ka võrdluselement, mis võrdleb mõõdetud tulemusi ning „switch“ plokk, mis tõese väärtuse korral kirjutab vana tulemuse üle.

Üks võimalik lahendus: Ühendada jõuandur NXT juhtploki külge. Luua ühendus juhtploki ja arvuti vahel kasutades selleks graafilist programmi LEGO MINDSTORMS NXT-G. Kinnitada jõuandur roboti külge. Ühte võimalikku kinnitusviisi saab näha jooniselt 21. Vernier anduri menüüribalt (vt. joonis 15) tuleb andur seadistada mõõdma jõudu ± 50 N. Samuti ka anduri peal olev lüliti panna asendisse ± 50 N.

Vaatame lähemalt ühte võimalikku ülesande lahendamise programmi (vt. joonis 23). Lahendusest on näha, et sisse on toodud hargnemine. See tähendab seda, et robot sõidab edasi ja tagasi ning samal ajal loetakse sisse ja võrreldakse jõuanduri näitu. Kui jõuanduri näit on väiksem, kui muutuja „Force“ väärtus, siis kirjutatakse muutuja väärtus üle uue mõõdetud tulemusega. Uue muutuja loomine käib ülevalt menüüst „Edit“ alt. Sealt tuleb valida „Define Variables“. Avanenud aknas saab „Create“ nupuga luua uusi muutujaid. Antud ülesande juures on oluline, et muutuja „Datatype“ oleks number. Jooniselt 23 on näha, et kõigepealt loeme sisse jõuanduri näidu ning väärtustame muutuja „Force“ loetud väärtusega. Tsükli sees võrreldakse omavahel muutuja „Force“ ja jõuandurilt saadud väärtusi. Kui jõuandurilt loetud väärtus on väiksem, siis on võrdlusploki väärtuseks „Tõene“ ning „Switch“ ploki sees

[illegible]

Ülesande lahendusfail asub lisana kaasasolevad CD plaadil ylesanne5_p6rge.rbt faili nime all.

Kokkuvõte

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks oli eestikeelse õppematerjali koostamine tutvustamiseks USA firma Vernier poolt toodetud jõuandurit, mida saab kasutada tulevikus koolides õppematerjali koostamisel ning huvitavamaks muutmisel. Kuna antud jõuandur on ühilduv spetsiaalse vaheliidese abil LEGO MINDSTORMS NXT õpikomplektis asuva NXT juhtploki, siis sobib antud töö materjal hästi kasutamiseks nii füüsika, robotika tundidesse kui ka robotika ringidesse.

Bakalaureusetöö kirjutamisel jälgisin juhendajate poolt etteantud vormistus- ja mõistekasutuse nõudeid. Selgitused püüdsin anda võimalikult selgesõnaliselt ja kergesti mõistetavalt. Seda sellepärast, et materjal oleks kergesti omandatav ka kesk- ja põhikooli õpilastele ja õpetajatele. Töö jälgis ühtset struktuuri teiste LEGO MINDSTORMS NXT teemaliste töödega ning on jaotatud kolmeks peatükiks.

Esimene peatükk andis ülevaate jõust ja selle olemusest looduses. Selgitasin lahti jõu leidmise valemi ning mõõtühiku. Kuna anduri kasutamisega tuli töösse palju uusi termineid ja mõisteid, siis selgitasin ka neid. Peatüki lõpuosas andsin ülevaate jõuanduri ehituspõhimõttest. Teises peatükis keskendusin konkreetset Vernier jõuandurile. Kirjeldasin selle tööpõhimõtet, kasutamise võimalusi, kaasasolevaid komponente ja programmeerimist LEGO MINDSTORMS Education NXT v2.0 keskkonnas.

Viimane peatükk sisaldab endas kolme erineva raskusastmega ülesandeid, mida eelnevalt omandatud materjali põhjal lahendada saab. Kolm esimest ülesannet võimaldavad läbi viia lihtsaid, kuid näitlikke ja huvitavaid katseid ning sobivad seetõttu rohkem füüsika- ja ringitundidesse. Neljas ja viies ülesanne sobivad rohkem informaatika tundidesse, kuna neis kasutatakse programmeerimisel ka keerulisemaid loogika elemente.

Töö edasiarendamise võimalusena näen LEGO MINDSTORMS NXT komplekti kõrvale luua ka täpne kirjeldus eesti keeles jõuanduri kasutamiseks ka teiste andmekogumisseadeldiste ning tarkvarapakettidega.

Dual-Range Force sensor for LEGO MINDSTORMS NXT

Bachelor Thesis

Arvi Kiik

Abstract

The main purpose of this bachelor thesis was to describe the dual-range force sensor. This sensor is made by USA company Vernier Software & Technology. Vernier have developed a comprehensive collection of more than 50 sensors for use with computers and other data collection software. Also the dual-range force sensor can be connect with the LEGO MINDSTORMS NXT kit.

This force sensor could be used for experiments in our physics, physical science, and middle school science lab manuals. It can be easily mounted on a ring stand or dynamics cart, or used as a replacement for a hand-held spring scale.

The work covers the theoretical aspect of force, underlying physical principles and definitions. It gives overview the force sensor technical specification, use cases and opportunities. Also this bachelor thesis contains information about connecting it with the NXT main unit and describes how to program force sensor in the LEGO MINDSTORMS Education v2.0 environment. To use theoretical knowledge in practice, five exercises were created, which can be solved using dual-range force sensor. The exercises are in three difficulty levels and contains information about the components needed to solve the exercise, description and the solution when students need help to finish the solution of the exercise.

This thesis is going to be a part of a teaching material that consists all LEGO MINDSTORMS NXT related bachelor thesis.

Kasutatud kirjandus

1. **Adoberg, R.** Isaac Newton. Õppematerjal. [<http://www.hot.ee/hothotrauno/isaac.html>] viimati vaadatud 05.02.2011.
2. Analoo-Digitaalmuundur. Vikipeedia, 23.10.2010.
[<http://et.wikipedia.org/wiki/Analoo-digitaalmuundur>] viimati vaadatud 05.05.2011.
3. Andur. Vikipeedia, 01.05.2010. [<http://et.wikipedia.org/wiki/Andur>] viimati vaadatud 12.12.2010.
4. Anduri üldine plokkskeem. Vikipeedia, 21.09.2006.
[http://et.wikipedia.org/wiki/Pilt:Anduri_%C3%BCldine_plokkskeem.jpg] viimati vaadatud 12.12.2010.
5. Andurid. AS Automeister. [<http://www.automeister.ee/?menuID=317>] viimati vaadatud 05.02.2011.
6. Dfs-bta. Vernier Software & Technology.
[http://engineering.vernier.com/images/sensors/dfs-bta_gallery05.jpg] viimati vaadatud 05.05.2011.
7. Digitaal-analoogmuundur. Vikipeedia, 04.04.2011.
[<http://et.wikipedia.org/wiki/Digitaal-analoogmuundur>] viimati vaadatud 05.05.2011.
8. Dual-range force sensor. Vernier Software & Technology, lk 1-4.
[<http://www2.vernier.com/booklets/dfs-bta.pdf>] viimati vaadatud 05.02.2011.
9. Dual-Range Force Sensor. Vernier Software & Technology.
[<http://www.vernier.com/probes/dfs-bta.html>] viimati vaadatud 05.05.2011.
10. Elastsusjõud. Tartu Ülikooli Teaduskool, lk 2,
14.06.2000.[ftp://ftp.ttkool.ut.ee/phys/kaug/mat_dyn.pdf] viimati vaadatud 06.02.2011.
11. For MINDSTORMS NXT 2.0 software. Vernier Software & Technology,
20.03.2009.[<http://www.vernier.com/nxt/downloads.html>] viimati vaadatud 03.04.2011.
12. **Halliste, M.** Jõud. [<http://www.hot.ee/mecamoka/kaheksas.html>] viimati vaadatud 05.02.2011.
13. **Halliste, M.** Keha impulss. [<http://www.hot.ee/mecamoka/seitsmes.html>] viimati vaadatud 05.02.2011.
14. HiTechnic Products. [<http://www.hitechnic.com/>] viimati vaadatud 23.05.2011.

15. International system of units. Wikipedia, 02.02.2011.
[http://en.wikipedia.org/wiki/International_System_of_Units] viimati vaadatud 05.02.2011.
16. Jõuandur. Vikipeedia, 11.12.2006. [<http://et.wikipedia.org/wiki/J%C3%B5uandur>] viimati vaadatud 12.12.2010.
17. Jõud. Miksike. [http://www.miksike.ee/docs/referaadid2005/joud_evelin.htm] viimati vaadatud 05.02.2011.
18. Jõud. Vikipeedia, 12.02.2010. [<http://et.wikipedia.org/wiki/J%C3%B5ud>] viimati vaadatud 12.12.2010.
19. Jõudude kolmnurk. Eesti Maaülikool, lk 3.
[<http://www.hot.ee/f/fyyslab/Lab.kolmnurk.pdf>] viimati vaadatud 05.05.2011.
20. Kehade vastastikmõjud ja jõud. Tallinna Reaalkool, lk 1.
[http://real.edu.ee/images/stories/fyysika/f_4.pdf] viimati vaadatud 05.02.2011.
21. Kooliroboti projekt. MTÜ Robootika. [<http://www.robootika.ee/lego/projekt/>] viimati vaadatud 03.04.2011.
22. LEGO MINDSTORMS NXT-G v2.0 lühitutvustus, MTÜ Robootika, lk 1, 13.01.2010.
[http://www.robootika.ee/lego/failid/EDU_NXT_v20.pdf] viimati vaadatud 03.04.2011.
23. LEGO MINDSTORMS NXT robot. Vocaro Technologies, 07.01.2008.
[<http://vocaro.com/trevor/blog/wp-content/uploads/2008/01/lego-mindstorms-nxt-robot.jpg>] viimati vaadatud 04.05.2011.
24. LEGO NXT lühitutvustus. MTÜ Robootika, lk 1-2, 02.01.2008.
[http://www.robootika.ee/lego/failid/NXT_robot_opetus.pdf] viimati vaadatud 03.04.2011.
25. **Lehtla, T.** Andurid. lk 5-6, 54.
[<http://www.ene.ttu.ee/elektriamid/oppeinfo/materjal/AAR3340/Andurid.pdf>] viimati vaadatud 03.04.2011.
26. Mindsensors. [<http://www.mindsensors.com/>] viimati vaadatud 23.05.2011.
27. Mūra. Vikipeedia, 24.11.2008. [<http://et.wikipedia.org/wiki/M%C3%BCra>] viimati vaadatud 05.05.2011.
28. NXT Model building instructions. HiTehnic Products.
[<http://www.hitechnic.com/models>] viimati vaadatud 03.04.2011.

29. Päring Eesti Wordnetist ehk TEKSaurusest. Estonian Wordnet, 19.02.2010.
[<http://www.cl.ut.ee/ressursid/teksaurus/teksaurus.cgi.et?otsi=kalibreerima,1,v>]
viimati vaadatud 05.02.2011.
30. **Sedjakin, A.** Analoogsignaali. [<http://www.euni.ee/kutsekeel/Programmjuhtimine/analoogsignaali.html>] viimati vaadatud 05.05.2011.
31. **Sedjakin, A.** Digitaalsignaali. [<http://www.euni.ee/kutsekeel/Programmjuhtimine/digitaalsignaali.html>] viimati vaadatud 05.05.2011.
32. **Sedjakin, A.** Signaalid. [<http://www.euni.ee/kutsekeel/Programmjuhtimine/signaalid.html>] viimati vaadatud 05.05.2011.
33. **Sõõrd, L.** Võnkumine. [<http://www.physic.ut.ee/~ly/xklass/pt0/sissej.htm>] viimati vaadatud 05.02.2011.
34. Tensotajur. Vikipeedia, 13.10.2006. [<http://et.wikipedia.org/wiki/Tensotajur>] viimati vaadatud 12.12.2010.
35. Tööturu ülevaade, lk 9.
[http://www.eestipank.info/pub/et/dokumendid/publikatsioonid/seeriad/tooturu/tooturg_110.pdf] viimati vaadatud 12.12.2010.
36. Using the Vernier adapter and Vernier block with MINDSTORMS. Vernier Software & Technology, 31.10.2007.
[http://www.vernier.com/nxt/using_the_vernier_sensor_block.pdf] viimati vaadatud 05.05.2011.
37. Vernier Software & Technology. [<http://www.vernier.com/>] viimati vaadatud 03.04.2011.
38. Video hõõrdejõu määramisest. Vernier Software & Technology.
[<http://www.vernier.com/videos/play.html?video=30>] viimati vaadatud 23.05.2011.
39. Video robotiteatrist. MTÜ Robootika.
[<http://www.robootika.ee/lego/projekt/index.php/teatrist/>] viimati vaadatud 23.05.2011.
40. Võimendi. Vikipeedia, 28.08.2010. [<http://et.wikipedia.org/wiki/V%C3%B5imendi>]
viimati vaadatud 05.05.2011.
41. Voolutarbijate tunnusjoonete leidmine. Eesti Maaülikool, 31.01.2011.
[<http://www.hot.ee/fyyslab/Lab4.voolutarb/>] viimati vaadatud 05.02.2011.

Lisad

Lisa 1 – Ülesannete lahendused ja videod

Tabelis 1 on toodud käesoleva bakalaureusetöö 3.osas kirjeldatud ülesannete lahendusfailid, mis asuvad tööga lisana kaasasoleva CD plaadi peal. Tegemist on NXT-G (*.rbt) programmifailidega ning (*.wmv) videofailidega. CD plaat on kinnitatud käesoleva bakalaureusetöö tagakaane siseküljele.

Faili nimi	Ülesande number ja nimi
ylesanne1_raskusj6ud.rbt	Ülesanne 1 - Mobiiltelefonile mõjuva raskusjõu määramine
ylesanne2_h66rdej6ud.rbt	Ülesanne 2 - Mobiiltelefonile mõjuva hõõrdejõu määramine
ylesanne3_t6mbej6ud.rbt ylesanne3_t6mbej6ud.wmv	Ülesanne 3 - NXT roboti tõmbejõu määramine
ylesanne4_loendur.rbt ylesanne4_loendur.wmv	Ülesanne 4 - Loendur
ylesanne5_p6rge.rbt ylesanne5_p6rge.wmv	Ülesanne 5 - NXT roboti seinaga kokkupõrkejõu arvutamine

Tabel 1. CD plaadi peal olevad ülesannete lahendusfailid